

Attorney Docket No. 1344.1141

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

In re Patent Application of:

Kenichi TORII, et al.

Application No.: TBA

Group Art Unit: TBA

Filed: March 30, 2004

Examiner: TBA

For: RAMAN AMPLIFIER AND OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM USING THE SAME

**SUBMISSION OF CERTIFIED COPY OF PRIOR FOREIGN  
APPLICATION IN ACCORDANCE  
WITH THE REQUIREMENTS OF 37 C.F.R. § 1.55**

Commissioner for Patents  
PO Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

In accordance with the provisions of 37 C.F.R. § 1.55, the applicants submit herewith a certified copy of the following foreign application:

Japanese Patent Application No. 2003-093023

Filed: March 31, 2003

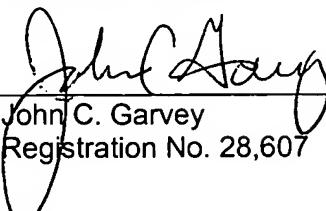
It is respectfully requested that the applicant be given the benefit of the foreign filing date as evidenced by the certified papers attached hereto, in accordance with the requirements of 35 U.S.C. § 119.

Respectfully submitted,

STAAS & HALSEY LLP

Date: 3-30-04

By:

  
John C. Garvey  
Registration No. 28,607

1201 New York Ave., N.W., Suite 700  
Washington, D.C. 20005  
Telephone: (202) 434-1500  
Facsimile: (202) 434-1501

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて  
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed  
with this Office.

出願年月日      2003年  3月31日  
Date of Application:

出願番号      特願2003-093023  
Application Number:

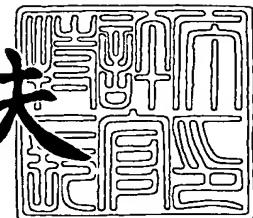
[ST. 10/C] :      [JP2003-093023]

出願人      富士通株式会社  
Applicant(s):

2003年12月25日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願  
【整理番号】 0350269  
【提出日】 平成15年 3月31日  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 H04B 10/12  
【発明の名称】 ラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システム  
【請求項の数】 5  
【発明者】  
【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通  
株式会社内  
【氏名】 鳥居 健一  
【発明者】  
【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通  
株式会社内  
【氏名】 内藤 崇男  
【発明者】  
【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通  
株式会社内  
【氏名】 田中 俊毅  
【発明者】  
【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通  
株式会社内  
【氏名】 幸 雅洋  
【特許出願人】  
【識別番号】 000005223  
【氏名又は名称】 富士通株式会社

**【代理人】**

【識別番号】 100078330

**【弁理士】**

【氏名又は名称】 笹島 富二雄

【電話番号】 03-3508-9577

**【手数料の表示】**

【予納台帳番号】 009232

【納付金額】 21,000円

**【提出物件の目録】**

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9719433

【プルーフの要否】 要

【書類名】明細書

【発明の名称】ラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システム

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

波長の異なる複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第1励起光発生部と、

該第1励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された1波長以上の励起光を発生する第2励起光発生部と、

前記第1および第2励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記増幅媒体に供給する合波部と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 2】

請求項1に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン増幅された波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器を備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 3】

ラマンシフト周波数の略2倍あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、

信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極小値および極大値のいずれかが略同一となるように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、

前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと

、  
前記増幅媒体を伝搬してラマン増幅された波長多重信号光を、ラマン利得の波長偏差に応じて予め設定した複数の波長帯に分波する分波器と、

該分波器で分波された波長多重信号光のパワーの波長偏差を前記波長帯ごとに低減する複数の利得等化器と、

該各利得等化器から出力される信号光を合波する合波器と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

#### 【請求項 4】

ラマンシフト周波数と同程度あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、

信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極大点および極小点が、予め設定した基準利得値を境界とする正の領域および負の領域に略均等に並ぶように

、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、

前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと

、  
信号光波長帯域の全体に亘って波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

#### 【請求項 5】

請求項 1～4 のいずれか 1 つに記載のラマン増幅器を備えて構成されたことを特徴とする光伝送システム。

#### 【発明の詳細な説明】

**【0001】****【発明の属する技術分野】**

本発明は、波長多重信号光をラマン効果を利用して増幅するラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システムに関し、特に、ラマン利得の波長依存性によって生じる信号光パワーの波長偏差の低減を図るために技術に関する。

**【0002】****【従来の技術】**

従来、長距離の光伝送システムにおいては、光信号を電気信号に変換し、等化増幅（reshaping）、タイミング抽出（retiming）および識別再生（regenerating）を行う再生中継器を用いて伝送を行っていた。しかし、現在では光増幅器の実用化が進み、光増幅器を線形中継器として用いる光増幅中継伝送方式が検討されている。光再生中継器を光増幅中継器に置き換えることにより、中継器内の部品点数を大幅に削減し、信頼性を確保すると共に大幅なコストダウンが見込まれる。

**【0003】**

また、光伝送システムの大容量化を実現する1つの方法として、1本の光伝送路に2つ以上の異なる波長を持つ光信号を多重して伝送する波長多重（WDM）光伝送方式が注目されている。WDM光伝送方式と光増幅中継伝送方式を組み合わせたWDM光増幅中継伝送方式においては、光増幅器を用いて2つ以上の異なる波長を持つ光信号を一括して増幅することが可能であり、簡素な構成（経済的）で、大容量かつ長距離伝送が実現可能である。

**【0004】**

光増幅中継伝送システムの中継器にはエルビウムドープファイバ増幅器（Erbium Doped Fiber Amplifier：EDFA）が一般的に用いられている。例えば、EDFAの利得波長帯域は1.55μm帯（C-バンド）であり、その利得波長帯域を長波長へシフトしたG S-E DFA（Gain shifted-EDFA）の利得波長帯域は1.58μm帯（L-バンド）である。上記のEDFAおよびG S-E DFAは、それぞれ30nm以上の利得波長帯域幅を有し、C-バンドおよびL-バンドに対応した合分波器を用いて2つの信号光波長帯域を併用することにより、6

0 nm以上 の 帯域幅を 実現する こと も 可能 である。

#### 【0005】

さらに、近年になってラマン増幅の適用が盛んに検討されている。ラマン増幅の利得ピーク光周波数は、例えば石英系ファイバを増幅媒体としたとき、その増幅媒体に供給する励起光の周波数よりも約 13.2 THz だけ低周波側にシフトした光周波数となる。これを光波長について言い換えると、ラマン増幅は励起光波長よりも長波長側に利得帯域を持ち、例えば 1.45 μm の励起光波長に対するラマン利得ピーク波長は、励起光波長を約 100 nm だけ長波長側にシフトした 1.55 μm 付近となる。

#### 【0006】

なお、以下の説明では、増幅媒体に与えられる励起光の周波数とその励起光に起因して得られるラマン利得のピーク周波数との差分のことを「ラマンシフト周波数」と呼ぶことにする。

#### 【0007】

このようなラマン増幅を利用した光増幅器において、要求される信号光波長に対して増幅作用を得るためにには、ラマンシフト周波数を考慮して励起光波長を設定可能であることが重要である。また、異なる中心波長を持つ複数の励起光を用いることでラマン増幅の利得波長特性を平坦化できることが知られている。例えば、複数の励起光源の発振波長および出力光パワーをそれぞれ調整することにより、ラマン増幅の利得波長帯域幅として 100 nm 程度を確保したという報告がある（例えば、非特許文献 1 参照）。

#### 【0008】

図 24 は、従来のラマン増幅器の構成例を示す図である。

図 24において、従来のラマン増幅器は、複数の励起光  $P_1 \sim P_K$  を発生する多波長励起光源 101 と、その多波長励起光源 101 から出力される励起光  $P_1 \sim P_K$  を増幅媒体である光ファイバ 100 に供給する合波器 102 とを備えて構成され、多波長励起光源 101 から合波器 102 を介して光ファイバ 100 に供給された励起光  $P_1 \sim P_K$  が信号光  $S_1 \sim S_L$  とは逆方向に伝搬する。この従来のラマン増幅器では、例えば図 25 に示すように、複数の信号光  $S_1 \sim S_L$  が所

要の間隔で配置された信号光波長帯域と、その信号光波長帯域に応じて複数の励起光  $P_1 \sim P_K$  が配置された励起光波長帯域とを分けた波長配置が適用される。また、信号光波長帯域について平坦な利得波長特性を得るため、例えば図26に示すように利得等化器103を併用した構成も知られている。

#### 【0009】

ところで、大容量長距離伝送システムを実現するためには、信号光波長帯域幅の拡大（広帯域化）が重要である。この広帯域化の実現のためにラマン増幅を利用した場合、信号光および励起光がある波長帯域内で混在するような波長配置の適用が有効であることが知られている（例えば、特許文献1、並びに、本出願人の先願である特願2001-244798号および特願2001-390366号参照）。

#### 【0010】

図27は、上記のような波長配置を適用したラマン増幅器の構成例を示す図である。また、図28は、図27のラマン増幅器における波長配置例を示す図である。図28に示すように複数の励起光  $P_1 \sim P_M$  のうちの一部が信号光波長帯域内に混在する場合には、図27に示すように励起光合波用の光デバイスとして光サーチュレータ104が使用される。なお、ここでは、信号光波長帯域内に混在しない励起光を  $P_1 \sim P_Q$  とし、信号光波長帯域内に混在する励起光を  $P_{Q+1} \sim P_M$  としている。また、前述の図26に示した構成と同様にして、信号光帯域に亘って平坦な利得波長特性を得るために利得等化器103を併用する構成（図27中の破線部分）もある。

#### 【0011】

上記のような信号光と励起光がある帯域内に混在する波長配置が適用されたラマン増幅器においては、励起光同士の間でラマン増幅が大きく生じるため、短波長側の励起光に要求されるパワーが極端に大きくなることが知られている。このため、励起光源の合波構成が複雑化する上、短波長側の励起光により発生する自然放出光雑音が増大し、短波長側信号光の雑音特性が劣化してしまうという問題がある。

#### 【0012】

この問題を解決する手法として、例えば、各励起光のパワーについて変調をかけ、ラマンシフト周波数に近い周波数差を有する励起光パワー同士の時間的な重なりを低減することにより、それらの励起光間に生じるラマン增幅の効率を低くして、ラマン増幅器の雑音特性を改善すると共に短波長側の励起光パワーを低減する技術が提案されている（例えば、本出願人の先願である特願 2002-334037号参照）。具体的には、例えば図 29 に示すような各励起光パワーの変調が行われる。この図 29 の一例は、ラマンシフト周波数  $\Delta f_{RAMAN}$  の 3 分の 1（石英系光ファイバを増幅媒体とした場合、 $\Delta f_{RAMAN} = 13.2 \text{ THz}$ 、 $\Delta f_{RAMAN}/3 = 4.4 \text{ THz}$ ）に対応する波長間隔に配置した 8 波長の励起光を用いる場合について、それぞれの励起光パワーの変化を示している。ただし、ここでは変調後の光パルスのデューティを 50% としている。励起光間に生じるラマン增幅の効率が最も高まるのは励起光同士がラマンシフト周波数  $\Delta f_{RAMAN}$  だけ離れている場合、すなわち、上記の一例では、励起光 P<sub>1</sub> と励起光 P<sub>4</sub>、励起光 P<sub>2</sub> と励起光 P<sub>5</sub>、励起光 P<sub>3</sub> と励起光 P<sub>6</sub>、励起光 P<sub>4</sub> と励起光 P<sub>7</sub>、励起光 P<sub>5</sub> と励起光 P<sub>8</sub> のそれぞれの組み合わせである。従って、これらが時間的に重ならないように各励起光のパワーに変調をかけることで、励起光間のラマン增幅が低減されて上記の問題を解決することが可能となる。

### 【0013】

#### 【特許文献 1】

特開 2002-229084 号公報

#### 【非特許文献 1】

Y. Emori, et al., “100nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes”, OFC’99, PD19, 1999.

### 【0014】

#### 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上記のような従来のラマン増幅器については次の（1）～（4）に示すような問題点がある。

### 【0015】

### (1) 利得等化の際の損失増大によるシステム性能劣化

複数の波長の励起光を用いて得られるラマン利得の波長に対するプロファイルは、例えば図30に示すように励起光の波長数に応じた複数のピークを有するものとなるが、それぞれのピーク波長は個々の励起光を単独で使用した場合に得られる利得ピーク波長とは異なる値を示すようになる。具体的に、図30の一例は、 $1433\text{ nm}$ および $1464\text{ nm}$ の2つの波長の励起光を使用した場合の波長に対するラマン利得の関係を示していて、図中の細線で示すように各々の励起光を単独で使用した場合には、ラマン利得プロファイルのピーク波長がそれぞれ $1529.6\text{ nm}$ および $1565.5\text{ nm}$ となる。これに対して、図中の太線で示すように2つの波長の励起光を同時に用いた場合には、利得プロファイルが $1538.2\text{ nm}$ および $1563.9\text{ nm}$ にピークを有するようになり、 $1433\text{ nm}$ の励起光に対応した利得ピークは $8.6\text{ nm}$ だけ長波長側にシフトし、 $1464\text{ nm}$ の励起光に対応した利得ピークは $1.6\text{ nm}$ だけ短波長側にシフトすることになる。

#### 【0016】

従って、複数の波長の励起光を用いたラマン増幅器においては、励起光の波長を等間隔に配置したとしても、実際に得られるラマン利得のプロファイルは等間隔の利得ピークを持たないことになる。このため、前述の図26などに示したような利得等化器を併用して行われる利得等化に際しては、複雑な損失プロファイルをもつ利得等化器を用いる必要がある。しかし、そのような利得等化器は一般に大きな損失を持つため、システム性能劣化の要因となり得る。また、例えば、グレーティング方向を光ファイバ軸から傾けた公知のスラント型ファイバプラッゲグレーティングなどのように、単独で複雑な損失プロファイルを実現する光デバイスも存在するが、そのようなデバイスは利得等化可能な波長範囲が一般に $40\text{ nm}$ 程度以下に限定されてしまう。このため、 $40\text{ nm}$ を超えるような広い信号光波長帯域を有するシステムにおいては、利得等化の都度、信号光を分波した後に利得等化を行い再び合波するといった処理が必要となり、分波器および合波器における過剰損失が問題となる場合がある。

#### 【0017】

## (2) 励起光の不等間隔配置による非効率化

上記(1)の問題点を回避して簡易な構成の利得等化器を使用できるようにするためには、例えば、ラマン利得プロファイルのピーク波長が等間隔となるように励起光の波長を選択することが考えられる。具体的に、例えば図31の実線で示すように23nm間隔で4つの利得ピークを得るために、1430nm、1448nm、1470nmおよび1502nmという波長間隔が一定でない4つの波長の励起光を使用することが必要になる。このような波長配置が不等間隔の励起光を用いれば、図31の点線で示すような周期的な損失波長特性を持つ簡易な構成の利得等化器を使用することが可能になる。

### 【0018】

しかしながら、前述の図29を参照して説明したように、信号光および励起光がある帯域内に混在する波長配置においては、励起光間のラマン増幅を効率的に行うために、励起光の周波数間隔をラマンシフト周波数の整数分の1に設定することが有効であり、複数の励起光の波長を不等間隔で配置することは、上記のような波長設定を適用したラマン増幅器における非効率化を招くことになる。

### 【0019】

また、本出願人は、前述の特願2001-244798号や特願2001-390366号において、信号光帯域内に混在する励起光のスペクトルを狭窄化する光フィルタを用いたり、励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを用いたりすることによって、システム性能の改善を図ることができることを示した。この際、励起光が等間隔に配置されていれば、それぞれの用途のために周期性をもつ光フィルタを適用することが可能になり多数の光フィルタを用いる必要がなくなるため損失およびコストの点で有利となる。一方、励起光が不等間隔に配置されてしまうと、上記のような利点が失われることになる。

### 【0020】

## (3) 短波長側の信号光帯域における利得偏差の増大によるシステム性能の劣化

前述の図27～図29に示したような増幅帯域幅がラマンシフト周波数と同程度またはそれ以上となるようなラマン増幅器においては、短波長側ほど利得偏差

が大きくなるという特性を持つ。この特性について図32および図33を用いて具体的に説明する。図32は、単一の波長（例えば1460.3nm）の励起光に対して、その励起光の短波長側および長波長側に複数の信号光を配置した一例であり、図33は、図32の信号光および励起光の波長配置において得られるラマン利得の波長特性を示したものである。各図に示すように、信号光帯域内に混在する1460.3nmの励起光は、励起光よりも長波長側（低周波側）の信号光に対して利得を与える一方、短波長側（高周波側）の信号光に対して損失を与える。また、ここでは図示しないが、增幅媒体として用いられる光ファイバの実効断面積は短波長ほど小さくなることが知られている。このため、励起光より短波長側の信号光と励起光との間で発生するラマン効果（損失）は、励起光より長波長側の信号光と励起光との間で発生するラマン効果（利得）よりも効率が高まるようになる。図33の具体例では、損失ピークの絶対値が約20.0dBとなるのに対して、利得ピークの絶対値が約14.1dBとなっており、短波長側のラマン効果の効率が長波長側よりも高くなることが分かる。

### 【0021】

上記のような1波の励起光によって得られるラマン効果の波長特性を踏まえて、次に、複数の波長の励起光を使用したラマン増幅器の利得波長特性について考える。図34は、ラマンシフト周波数の約4倍となる増幅帯域幅を有するラマン増幅器について計算した利得波長特性の一例である。なお、図34の利得波長特性は、ラマンシフト周波数を13.2THzとし、その約4倍に相当する56.5THzの増幅帯域幅、波長にすると1277.3nm～1682.3nmの範囲に該当する405nmの増幅帯域幅を有するラマン増幅器について、13波長の励起光P<sub>1</sub>～P<sub>13</sub>を4.4THz（ラマンシフト周波数の3分の1）の等しい周波数間に配置すると共に（下記の表1参照）、前述の図29に示したような各励起光に対する変調を施して励起光間のラマン増幅を抑圧するようにした場合の計算結果である。

### 【0022】

【表1】

励起光	光周波数 (THz)	光波長 (nm)
P <sub>1</sub>	244.9	1224.1
P <sub>2</sub>	240.5	1246.5
P <sub>3</sub>	236.1	1269.8
P <sub>4</sub>	231.7	1293.9
P <sub>5</sub>	227.3	1318.9
P <sub>6</sub>	222.9	1345.0
P <sub>7</sub>	218.5	1372.0
P <sub>8</sub>	214.1	1400.2
P <sub>9</sub>	209.7	1429.6
P <sub>10</sub>	205.3	1460.3
P <sub>11</sub>	200.9	1492.2
P <sub>12</sub>	196.5	1525.7
P <sub>13</sub>	192.1	1560.6

## 【0023】

図34中の太線で示した13波長の励起光使用時に得られるラマン利得のプロファイルは、図34中の細線で示した各励起光P<sub>1</sub>～P<sub>13</sub>を単独で用いた時に得られる各々のラマン利得の重ね合わせにより近似的に求めている。また、ここでは、全励起光による利得の極小値が約10dBとなるように各励起光のパワーが調整されている。このような計算結果では、全励起光による利得の平均値は約12.0dBとなり、利得偏差は約8.7dBとなっている。

## 【0024】

図34に示すように、最長波長の利得ピーク付近の增幅に寄与する励起光は最長波長の励起光P<sub>13</sub>のみであり、複数の励起光が寄与するその他の利得ピークと比較して励起光P<sub>13</sub>の負担は大きい。このため、平坦な利得を得るために、最長波長の励起光P<sub>13</sub>によるラマン効果で比較的大きな利得が得られる必要がある。この場合、上記の図33に示した関係より明らかのように、励起光P<sub>13</sub>より短波長側に発生する損失のピークも比較的大きくなる。

## 【0025】

この励起光P<sub>13</sub>による損失ピークを補償するため、最長波長の励起光P<sub>13</sub>

よりも周波数で26.4 THz高周波（短波長）側に存在する励起光P<sub>7</sub>によるラマン効果は、大きな利得をもつ必要がある。これと同様にして、励起光P<sub>7</sub>よりも周波数で26.4 THz高周波側の励起光P<sub>1</sub>によるラマン効果は、さらに大きな利得をもつ必要がある。このため、短波長側での利得偏差は特に大きくなる。次の表2に示すデータは、各波長の励起光P<sub>1</sub>～P<sub>13</sub>にそれぞれ対応したラマン利得の極大値および極小値をまとめたものであり、図35は、表2の各データを横軸を波長、縦軸を利得としてプロットしたものである。

## 【0026】

【表2】

励起光	極大波長 (nm)	極大周波数 (THz)	極大値 (dB)	極小波長 (nm)	極小周波数 (THz)	極小値 (dB)
P <sub>1</sub>	1301.2	230.4	18.2	1310.3	228.8	9.9
P <sub>2</sub>	1322.4	226.7	18.2	1336.0	224.4	10.1
P <sub>3</sub>	1348.6	222.3	15.3	1362.7	220.0	10.1
P <sub>4</sub>	1378.4	217.5	14.2	1392.4	215.3	10.0
P <sub>5</sub>	1408.1	212.9	13.4	1422.2	210.8	10.1
P <sub>6</sub>	1438.5	208.4	14.4	1450.4	206.7	9.9
P <sub>7</sub>	1466.0	204.5	13.7	1479.7	202.6	9.9
P <sub>8</sub>	1495.2	200.5	14.1	1513.3	198.1	10.1
P <sub>9</sub>	1528.8	196.1	11.7	1547.7	193.7	10.1
P <sub>10</sub>	1565.5	191.5	11.6	1584.5	189.2	10.2
P <sub>11</sub>	1601.5	187.2	11.0	1620.5	185.0	10.1
P <sub>12</sub>	1640.9	182.7	11.3	1659.1	180.7	10.1
P <sub>13</sub>	1672.9	179.2	10.6			

## 【0027】

表2および図35から明らかなように、信号光の波長帯域の拡大に伴って短波長側の利得偏差が拡大するため、要求される利得等化器の構成が複雑なものとなり損失が増大し、システム性能を劣化させる要因となる。

## 【0028】

## (4) 利得波長特性の形状が複雑化することによるシステム性能の劣化

前述の図34に示した計算結果からも推察されるように、ラマン増幅器の増幅帯域幅が増大すると利得波長特性が複雑化する。例えば、図34に示した利得波

長特性のうちの増幅帯域部分を拡大した図36に示すように、当該部分の利得波長特性は、利得偏差の大きさが略同程度となる複数の波長帯B<sub>1</sub>，B<sub>2</sub>，B<sub>3</sub>に区分できるような複雑な形状となる。このような複雑な形状の利得波長特性を有するラマン増幅器に対して、一般的に使用される周期的な損失特性を有する光フィルタを適用しても有効な利得等化を行うことは困難である。

#### 【0029】

図37は、図36の利得波長特性に対して周期的な損失特性を有する光フィルタを適用して利得等化を行った場合の一例を示した図である。図中の細線が利得等化前の特性、太線が利得等化器の損失波長特性、極太線が利得等化後の特性をそれぞれ表している。ここでは、所要の利得を確保しつつ、図36で大きな利得偏差が発生している波長帯B<sub>1</sub>についての利得偏差が低減可能となるように、2種類の周期性光フィルタを用いて利得等化を行う。具体的に、利得等化器として用いる2種類の光フィルタは、周期3.76THz、振幅3.0dBおよび中心周波数230.4THzの損失波長特性を有するものと、周期4.41THz、振幅1.2dBおよび中心周波数231.1THzの損失波長特性を有するものとを組み合わせている。図中の極太線で表された利得等化後の特性を見ると、短波長側の波長帯B<sub>1</sub>に関しては、利得偏差が低減され、かつ、10dB前後の利得を確保できているが、それ以外の波長帯B<sub>2</sub>および波長帯B<sub>3</sub>に関しては、利得偏差が増大し、利得の値が大きく減少していることが分かる。

#### 【0030】

従って、図36のようなラマン利得の波長偏差を平坦化するためには、より大きな損失偏差と複雑な損失波長特性を持つ利得等化器の適用が要求される。このような利得等化器は大きな損失を持つため、システム性能を劣化させる要因となる。また、単独で複雑な損失波長特性を実現可能なスラント型ファイバブランググレーティングなどの公知の光デバイスを適用したとしても、前述した（1）の問題点で説明したのと同様にして、利得等化可能な波長範囲が制限されてしまうため、信号光帯域幅の増大とともに分波器および合波器における過剰損失が増加し、システム性能を劣化させる要因となる。

#### 【0031】

本発明は、上述した（1）～（4）の各問題点に着目してなされたもので、システム性能劣化を抑えながらラマン利得の波長偏差を容易に低減できるラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システムを提供することを目的とする。

### 【0032】

#### 【課題を解決するための手段】

上記の目的を達成するため、第1の発明にかかるラマン増幅器は、波長の異なる複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第1励起光発生部と、該第1励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるよう波長およびパワーが設定された1波長以上の励起光を発生する第2励起光発生部と、前記第1および第2励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記増幅媒体に供給する合波部と、を備えて構成されるものである。

### 【0033】

かかる構成のラマン増幅器では、等波長間隔で配置された第1励起光と同時に、その短波長側または長波長側の帯域に配置された第2励起光を増幅媒体に供給され、信号光波長帯域における利得ピーク波長が実質的に等間隔に並んだ利得波長特性に従って波長多重信号光のラマン増幅が行われるようになる。これにより、例えば、ラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有する、簡略な構成で低損失の利得等化器を利用して、ラマン増幅された波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減することができ、システム性能の改善を図ることが可能になる。

### 【0034】

また、第2の発明にかかるラマン増幅器は、ラマンシフト周波数の略2倍あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号

光を増幅するラマン増幅器であって、前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極小値および極大値のいずれかが略同一となるように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーチュレータと、前記増幅媒体を伝搬してラマン増幅された波長多重信号光を、ラマン利得の波長偏差に応じて予め設定した複数の波長帯に分波する分波器と、該分波器で分波された波長多重信号光のパワーの波長偏差を前記波長帯ごとに低減する複数の利得等化器と、該各利得等化器から出力される信号光を合波する合波器と、を備えて構成されるものである。

### 【0035】

かかる構成のラマン増幅器では、信号光波長帯域におけるラマン利得の極小値が極大値の一方が略同一となるように複数の励起光のパワーが制御された状態で波長多重信号光のラマン増幅が行われ、そして、ラマン増幅後の波長多重信号光は、ラマン利得の波長偏差に応じて設定された複数の波長帯ごとに分波されて利得等化が行われる。このとき各波長帯に対応した利得等化器として簡略な構成で低損失のものが使用できるようになるため、利得等化に起因したシステム性能の劣化を抑えることが可能になる。

### 【0036】

また、第3の発明にかかるラマン増幅器は、ラマンシフト周波数と略同じかあるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極大点および極小点が、予め設定した基準利得値を境界とする正の領域および負の領域に略均等に並ぶように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、前記励起光源で発生する励起

光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと、信号光波長帯域の全体に亘って波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器と、を備えて構成されるものである。

#### 【0037】

かかる構成のラマン増幅器では、信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極大点および極小点が基準利得値を境界に略正負均等に並ぶように複数の励起光のパワーが制御された状態で波長多重信号光のラマン増幅が行われ、そのラマン増幅された波長多重信号光の全波長帯域に亘るパワーの波長偏差が、簡略な構成で低損失の利得等化器によって一括して低減されるようになり、利得等化に起因したシステム性能の劣化を抑えることが可能になる。

#### 【0038】

##### 【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。なお、全図を通して同一の符号は同一または相当部分を示すものとする。

#### 【0039】

図1は、本発明の第1実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。また、図2は、図1のラマン増幅器における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

#### 【0040】

図1において、第1実施形態のラマン増幅器は、例えば、増幅媒体としての光ファイバ10を伝搬するWDM信号光をラマン増幅するための励起光を発生する多波長励起光源11と、その多波長励起光源11で発生した励起光を光ファイバ10に与える合波部12と、ラマン増幅の利得波長特性に応じてWDM信号光に発生する波長間の光パワー偏差を低減する利得等化器13と、を備えて構成される。

#### 【0041】

光ファイバ10は、例えば、本ラマン増幅器が適用される光伝送システムの端局または中継局間を接続する光伝送路とすることができます。また、光伝送路とは別に設けた非線形効果の発生し易いラマン増幅用光ファイバを適用してもよい。

前者の場合は分布型ラマン増幅器となり、後者の場合は集中型ラマン増幅器となる。この光ファイバ10を一方向（図1では右方）に伝搬するWDM信号光は、図2に示すように波長の異なる複数の信号光S<sub>1</sub>～S<sub>L</sub>を含んでいる。

#### 【0042】

多波長励起光源11は、例えば、第1励起光発生部20、第2励起光発生部21および合波器22を有する。第1励起光発生部20は、波長の異なる複数の励起光P<sub>1</sub>～P<sub>K</sub>を所要のパワーで出力する。各励起光P<sub>1</sub>～P<sub>K</sub>の波長は、光ファイバ10を伝搬する信号光S<sub>1</sub>～S<sub>L</sub>の波長に応じて設定されており、具体的には図2に示すように、信号光S<sub>1</sub>～S<sub>L</sub>の波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅程度だけ短波長側にシフトさせた帯域内に各励起光P<sub>1</sub>～P<sub>K</sub>が等しい波長間隔で配置されている。なお、以下の説明では、励起光P<sub>1</sub>～P<sub>K</sub>のことを第1励起光と総称することにする。

#### 【0043】

第2励起光発生部21は、第1励起光の波長帯域よりも短波長側に波長配置された励起光P<sub>A</sub>と、第1励起光の波長帯域よりも長波長側に波長配置された励起光P<sub>B</sub>とを所要のパワーでそれぞれ出力する。短波長側の励起光P<sub>A</sub>は、具体的には図2に示すように、第1励起光のうちの最短波長の励起光P<sub>1</sub>よりもさらに短波長側の帯域に2波の励起光P<sub>A1</sub>、P<sub>A2</sub>が所要の波長間隔で配置されている。また、長波長側の励起光P<sub>B</sub>は、第1励起光のうちの最長波長の励起光P<sub>K</sub>よりもさらに長波長側の帯域に2波の励起光P<sub>B1</sub>、P<sub>B2</sub>が所要の波長間隔で配置されている。なお、以下の説明では、励起光P<sub>A1</sub>、P<sub>A2</sub>、P<sub>B1</sub>、P<sub>B2</sub>のことを第2励起光と総称することにする。ただし、ここでは第1励起光の波長帯域に対して短波長側および長波長側の両方の帯域に複数の励起光をそれぞれ配置するようにしたが、本発明はこれに限らず、短波長側および長波長側のいずれかの帯域に少なくとも1つの励起光を配置して、それを第2励起光とすることが可能である。

#### 【0044】

合波器22は、各励起光発生部20、21から出力される第1および第2励起光を合波し、それを合波部12に送る。

上記の多波長励起光源11は、例えば図3に示すような具体的な構成により実現することが可能である。図3の構成例では、各波長の励起光P<sub>1</sub>～P<sub>K</sub>, P<sub>A</sub>1, P<sub>A</sub>2, P<sub>B</sub>1, P<sub>B</sub>2にそれぞれ対応した励起光源が用意され、各励起光源からの出力光が合波器22の各入力ポートに送られて合波される。そして、ここでは合波された励起光が複数のシステム（図では4つのシステムSYS1～SYS4）に対応させて分岐され、その分岐光うちの1つが合波部12に与えられる。

#### 【0045】

合波部12は、多波長励起光源11からの第1および第2励起光を光ファイバ10の信号光出力側の一端に与えると共に、光ファイバ10を伝搬してラマン増幅されたWDM信号光を後段の利得等化器13に伝える。ここでは、合波部12により光ファイバ10に与えられた第1および第2励起光は、WDM信号光の伝搬方向とは逆方向に光ファイバ10内を伝搬することになる。この合波部12としては、図2に示したような信号光波長帯域と励起光波長帯域とが分かれた波長配置が適用される場合には、例えばWDMカプラを用いることができる。また、ここでは図示しないが励起光が信号光波長帯域の一部に混在するような波長配置が適用される場合には、例えば光サーチュレータを合波部12として使用することが可能である。

#### 【0046】

利得等化器13は、多波長励起光源11からの第1および第2励起光が供給された光ファイバ10を伝搬してラマン増幅されたWDM信号光が合波部12を介して与えられる。この利得等化器13は、ラマン増幅の利得波長特性に対応した透過（または損失）波長特性を有し、上記WDM信号光に発生した波長間の光パワー偏差を低減して平坦なWDM信号光を生成する。利得等化器13の具体的な構成としては、後述するようにラマン増幅の利得波長特性のピークが等しい波長間隔で並ぶようになるため、例えば図4に示すような周期的な透過波長特性を持つマッハツエンダ型光フィルタなどの一般的な周期光フィルタを使用することができる。

#### 【0047】

次に、第1実施形態のラマン増幅器の作用について説明する。

本実施形態のラマン増幅器では、信号光S<sub>1</sub>～S<sub>L</sub>の波長帯域に対応した従来と同様の第1励起光P<sub>1</sub>～P<sub>K</sub>に加えて、その第1励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の帯域に配置された第2励起光P<sub>A</sub>、P<sub>B</sub>が、増幅媒体としての光ファイバ10に与えられることにより、光ファイバ10におけるラマン増幅の利得ピーク波長が信号光波長帯域について等しい波長間隔で並ぶようになる。

#### 【0048】

図5は、本ラマン増幅器により実現される利得波長特性の具体例を示した図である。ここでは、第2励起光を加えたことによる効果を明らかにするために、光ファイバ10に対して第1励起光のみを供給したときの利得波長特性（細線）と、第1および第2励起光の両方を供給したときの利得波長特性（太線）とが重ねて示してある。また、次の表3に示すデータは、図5に示した各特性の利得ピーク波長と隣り合う利得ピークの周波数間隔とをまとめたものである。

#### 【0049】

#### 【表3】

第1励起光のみ供給		第1,2励起光を供給	
ピーク波長 (nm)	周波数間隔 (THz)	ピーク波長 (nm)	周波数間隔 (THz)
-	-	1445	-
-	-	1472	3.9
1510	-	1505	4.4
1537	3.5	1539	4.4
1575	4.7	1575	4.4
1603	3.4	1609	4.1
-	-	1651	4.7
-	-	1682	3.4

#### 【0050】

図5および表3に示す利得波長特性の具体例では、第1励起光として1409

0 nm、1438.8 nm、1469.8 nmおよび1502.2 nmの4つ

の波長の励起光P<sub>1</sub>～P<sub>4</sub>が設定されている。また、その第1励起光の波長帯域よりも短波長側に配置される第2励起光として1353.0 nmおよび1380.5 nmの2つの波長の励起光P<sub>A1</sub>, P<sub>A2</sub>が設定され、長波長側に配置される第2励起光として1536.1 nmおよび1571.5 nmの2つの波長の励起光P<sub>B1</sub>, P<sub>B2</sub>が設定されている。さらに、第1および第2励起光のいずれについても各励起光の波長間隔は、周波数にして4.4 THzの等間隔に設定されている。加えて、前述の図29に示したような励起光パワーの変調を行い、励起光間に生じるラマン增幅の効率が小さくなるような措置が施されている。なお、上記の波長配置においては、長波長側の第2励起光が信号光波長帯域の一部に混在することになるため、合波部12としては光サーキュレータが使用される。

#### 【0051】

上記のような励起光の波長配置において、第1励起光のみを光ファイバ10に与えた場合の利得波長特性は、短波長側から2番目の利得ピークと3番目の利得ピークとの間隔(4.7 THz)のみが励起光の間隔(4.4 THz)に近い値となり、その外側のピークの間隔は励起光の間隔よりも狭く(3.5 THz, 3.4 THz)なっていて、利得ピークが等間隔には並んでいないことが分かる。これに対して、第1および第2励起光を光ファイバ10に与えた場合の利得波長特性は、信号光波長帯域内に存在する3番目の利得ピークから6番目の利得ピークまでの間隔(4.4 THzまたは4.1 THz)が励起光の間隔(4.4 THz)に近い値となっていて、利得ピークが略等間隔に並んでいることが分かる。

#### 【0052】

従って、光ファイバ10を伝搬するWDM信号光は、上記のようなピークが略等間隔で並んだ利得波長特性に応じてラマン增幅されるようになるため、ラマン增幅後のWDM信号光に生じる波長間のパワー偏差も周期的に変化するようになる。これにより、前述の図4に示したように、ラマン增幅の各利得ピーク波長で透過率が極小(損失が極大)となり、各利得ピークの中間の波長で透過率が極大(損失が極小)となるような周期的なフィルタ特性を持つ利得等化器13を用いて、WDM信号光の波長間のパワー偏差を効率的に平坦化することが可能になる。このような周期的に変化するプロファイルを持つ利得等化器13はマッハツエ

ンダ型光フィルタなどの一般的な周期光フィルタを用いて容易に実現することができ、上記のような周期性光フィルタは簡略な構成で損失が比較的小さいため、従来のように利得等化器がシステム性能劣化の要因となってしまうことを回避できる。また、上記のような周期的な利得等化器 13 は、利得等化可能な波長範囲が非常に広いため、従来のように WDM 信号光を分波して所要の帯域ごとに利得等化を行い再び合波するといった必要がなくなり、分波器や合波器における過剰損失の問題を解消することが可能となる。

#### 【0053】

なお、上記の第 1 実施形態の説明では、複数の励起光間に生じるラマン增幅の効率が小さくなるように励起光パワーの変調を行う場合の一例を示したが、励起光パワーの変調を行わない構成のラマン增幅器についても本発明は有効であり、これについては、以下に示す他の実施形態においても同様である。

#### 【0054】

次に、本発明の第 2 実施形態について説明する。

図 6 は、第 2 実施形態のラマン增幅器の構成を示すブロック図である。

図 6において、本実施形態のラマン增幅器は、前述の図 1 に示した第 1 実施形態の構成について、ラマン增幅後の WDM 信号光パワーの波長特性をモニタするための光カプラ 14 およびモニタ部 15 と、そのモニタ部 15 での検出結果に基づいて第 2 励起光発生部 21 を制御する制御部 16 とを設けたものである。上記以外の他の部分の構成は第 1 実施形態の構成と同一であるためここでの説明を省略する。

#### 【0055】

光カプラ 14 は、例えば、合波部 12 から利得等化器 13 に送られる WDM 信号光の一部を分岐し、その分岐光をモニタ部 15 に出力する。モニタ部 15 は、光カプラ 14 で分岐された WDM 信号光についての波長に対する光パワーの変化（光スペクトル）をモニタし、そのモニタ結果を制御部 16 に出力する。

#### 【0056】

制御部 16 は、モニタ部 15 からのモニタ結果に基づいて、信号光波長帯域についてのラマン增幅の利得プロファイルを判断し、その利得プロファイルが予め

設定した形状に近づくように、第2励起光発生部21で発生する第2励起光のパワー若しくは波長を制御する。

#### 【0057】

前述した第1実施形態のラマン増幅器では、励起光源の故障あるいは経時劣化などによって複数の励起光のうちのいずれかの強度や波長が変化すると、ラマン増幅の利得プロファイルが予め設定した正常な状態の利得プロファイルから変化してしまう。そこで、第2実施形態のラマン増幅器では、上記のような構成を適用することにより、ラマン増幅後のWDM信号光のスペクトルがモニタ部15でモニタされ、そのモニタ結果を基に実際に得られるラマン増幅の利得プロファイルが制御部16で判断される。そして、判断された実際の利得プロファイルが予め設定された利得プロファイルと比較されて何らかの変化が生じた場合には、制御部16によって、元の正常な状態の利得プロファイルが得られるように第2励起光のパワー若しくは波長が最適化される。

#### 【0058】

具体的に、実際に得られるラマン増幅の利得プロファイルに基づいて、例えば、前述の第1実施形態において例示した4つの波長の第1励起光（1409.0 nm、1438.8 nm、1469.8 nm、1502.2 nm）のうちの1438.8 nmの励起光P<sub>2</sub>のパワーが減少していることが判断された場合には、ラマンシフト周波数に対応した波長幅程度だけ短波長側に位置する1353.0 nmの励起光P<sub>A1</sub>のパワーを増加させるか、または、ラマンシフト周波数に対応した波長幅程度だけ長波長側に位置する1536.1 nmの励起光P<sub>B1</sub>のパワーを減少させればよい。また、第1励起光のうちの複数の波長の励起光パワーが変化していることが判断された場合には、第2励起光のうちの複数の波長の励起光パワーを調整するのが好ましい。さらに、波長可変の励起光源を用いて第2励起光が生成されているときには、上記のような励起光パワーの制御だけでなく第2励起光の波長を最適化することで、より柔軟かつ高い精度の制御を行うことが可能になる。

#### 【0059】

次に、本発明の第3実施形態について説明する。

図7は、第3実施形態のラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

図7において、本実施形態のラマン増幅器は、例えば、増幅媒体としての光ファイバ10を伝搬するWDM信号光をラマン増幅するための励起光を発生する多波長励起光源30と、その多波長励起光源30で発生する各波長の励起光パワーを制御する励起光パワー制御部31と、多波長励起光源30から出力される励起光を光ファイバ10に与える光サーチュレータ32と、光ファイバ10を伝搬し光サーチュレータ32を通過したWDM信号光を複数の波長帯に分波する分波器33と、各波長帯に分波された信号光の波長間のパワー偏差を各々の波長帯ごとに低減する利得等化器34<sub>1</sub>, 34<sub>2</sub>, …, 34<sub>n</sub>と、各利得等化器34<sub>1</sub>～34<sub>n</sub>から出力される信号光を合波して出力する合波器35と、を備えて構成される。

#### 【0060】

上述した第1実施形態の場合と同様の光ファイバ10を伝搬するWDM信号光は、例えば図8に示すように、ラマンシフト周波数の略2倍あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に所要の波長間隔で配置された複数の信号光S<sub>1</sub>～S<sub>N</sub>を含んでいる。

#### 【0061】

多波長励起光源30は、図8に示すように、信号光S<sub>1</sub>～S<sub>N</sub>の波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅程度だけ短波長側にシフトさせた帯域内に配置された波長の異なる複数の励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>を発生する。この多波長励起光源30で発生する各励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>のパワーは、後述するように信号光波長帯域におけるラマン利得の極小値が略同一となるように励起光パワー制御部31によって制御されている。上記多波長励起光源30で発生する励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>は、上述した第1実施形態における第1励起光に相当するものである。ただし、ここでは励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>のうちの長波長側に位置する励起光が信号光波長帯域の一部に混在する波長配置が適用される。

#### 【0062】

光サーチュレータ32は、多波長励起光源30からの励起光を光ファイバ10の信号光出力側の一端に与えると共に、光ファイバ10を伝搬してラマン増幅さ

れたWDM信号光を後段の分波器33に伝える。ここでは、光サーチュレータ32により光ファイバ10に与えられた励起光は、WDM信号光の伝搬方向とは逆方向に光ファイバ10内を伝搬することになる。

#### 【0063】

分波器33は、光サーチュレータ32から伝えられるWDM信号光を複数の波長帯B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, …, B<sub>n</sub>に分波して各波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>に対応したポートからそれぞれ出力する。上記の各波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>は、後述するようにラマン利得の波長偏差が略同じになる範囲を1つの波長帯として予め設定したものである。分波器33の具体的な構成としては、例えば、複数の誘電体多層膜フィルタを多段接続した構成などを適用することが可能である。

#### 【0064】

各利得等化器34<sub>1</sub>～34<sub>n</sub>は、分波器33の各波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>に対応した出力ポートに接続され、各々の波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>におけるラマン増幅の利得波長特性に対応した透過（または損失）波長特性を有し、分波器33で分波された各波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>N</sub>の信号光に発生した波長間の光パワー偏差を低減して平坦な信号光をそれぞれ生成する。各利得等化器34<sub>1</sub>～34<sub>n</sub>としては、各々の波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>としてラマン利得の波長偏差が同程度となる範囲が設定されているため、簡略な構成の周期性光フィルタを使用することが可能である。なお、各利得等化器34<sub>1</sub>～34<sub>n</sub>の具体的な構成例については後述する。

#### 【0065】

合波器35は、各利得等化器34<sub>1</sub>～34<sub>n</sub>から出力される信号光が各波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>に対応したポートに入力され、各々の波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>の信号光を合波して1つのポートから出力する。この合波器35の具体的な構成としては、例えば、複数の誘電体多層膜フィルタを多段接続した構成などを適用することが可能である。

#### 【0066】

次に、第3実施形態のラマン増幅器の作用について説明する。

ラマンシフト周波数の略2倍あるいはそれ以上の波長帯域を有するWDM信号光のラマン増幅を行う場合、上述の（3）や（4）の問題点において説明したよ

うに、その利得波長特性は非常に複雑な形状となるため、ラマン増幅された信号光の波長間のパワー偏差を低減する利得等化器は、その構成が複雑なものとなり損失が増大してシステム性能劣化の要因となってしまう。そこで、本実施形態のラマン増幅器は、信号光波長帯域におけるラマン利得の極小値が略同一となるよう複数の励起光  $P_1 \sim P_M$  のパワーを制御し、かつ、ラマン利得の波長偏差が同程度となる複数の波長帯  $B_1 \sim B_n$  に応じてラマン増幅後のWDM信号光を分波して個別に利得等化を行うことによって、各波長帯  $B_1 \sim B_n$  に対応した利得等化器として簡略な構成のものを使用可能にして損失の増大を抑えるようにしている。

#### 【0067】

具体的に、多波長励起光源30から光サーキュレータ32を介して光ファイバ10に供給される励起光  $P_1 \sim P_M$  として、上述の表1に示した場合と同一の条件に設定した13波長の励起光  $P_1 \sim P_{13}$  を適用した場合の一例を挙げて、上記の内容を詳しく説明する。

#### 【0068】

図9は、上記のような励起光  $P_1 \sim P_{13}$  を適用した場合の利得波長特性の計算例である。なお、図9中の細線で示す特性が利得等化前のラマン利得の波長特性であり、太線で示す特性が利得等化器の損失波長特性であり、極太線で示す特性が利得等化後のラマン利得の波長特性である。

#### 【0069】

図9の具体例において、まず、利得等化前のラマン利得の波長特性（細線）に注目すると、信号光波長帯域（増幅帯域）のラマン利得の極小値が略同一のレベル  $L_{MIN}$  に制御されていることが分かる。そして、その利得波長特性については、隣り合う極小値と極大値の偏差が同程度となる3つの波長帯  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  を設定することができることも分かる。具体的に、ここでは波長帯  $B_1$ ,  $B_2$  の境界部分に  $1334 \sim 1338 \text{ nm}$  の波長範囲のガードバンド  $B_{G1}$  が設定され、波長帯  $B_2$ ,  $B_3$  の境界部分に  $1511.3 \sim 1515.3 \text{ nm}$  の波長範囲のガードバンド  $B_{G2}$  が設定されて、増幅帯域全体が3つの波長帯  $B_1 \sim B_3$  に区分されるようにしている。

### 【0070】

次に、利得等化器の損失波長特性（太線）に注目すると、ラマン利得の波長偏差が最も大きい波長帯B<sub>1</sub>に対応した利得等化器34<sub>1</sub>については、例えば、上述の図37に示した場合と同様にして、周期3.76THz、振幅3.0dBおよび中心周波数230.4THzの損失波長特性を有する周期性光フィルタと、周期4.41THz、振幅1.2dBおよび中心周波数231.1THzの損失波長特性を有する周期性光フィルタとを組み合わせた構成を適用することにより、波長帯B<sub>1</sub>におけるラマン利得の波長偏差に対応した損失波長特性を実現している。また、波長帯B<sub>2</sub>に対応した利得等化器34<sub>2</sub>については、例えば、周期4.55THz、振幅0.9dBおよび中心周波数222.3THzの損失波長特性を有する周期性光フィルタと、周期4.33THz、振幅1.0dBおよび中心周波数200.5THzの損失波長特性を有する周期性光フィルタとを組み合わせた構成を適用することにより、波長帯B<sub>2</sub>におけるラマン利得の波長偏差に対応した損失波長特性を実現している。さらに、波長帯B<sub>3</sub>に対応した利得等化器34<sub>3</sub>については、周期4.4THz、振幅0.7dBおよび中心周波数187.2THzの1種類の周期性フィルタを適用することにより、波長帯B<sub>3</sub>におけるラマン利得の波長偏差に対応した損失波長特性を実現している。

### 【0071】

上記のように各々の波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>3</sub>ごとに損失波長特性が最適化された簡略な構成の利得等化器34<sub>1</sub>～34<sub>3</sub>を用いて利得等化を行うことにより、図9に示すように利得等化後の波長特性（極太線）は、3つの波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>3</sub>すべてについて、ラマン利得の波長偏差が効果的に低減されており、かつ、10dB前後のラマン利得が確保されていることが分かる。

### 【0072】

従って、第3実施形態のラマン増幅器によれば、広帯域の信号光をラマン増幅する場合においても、簡略な構成の利得等化器34<sub>1</sub>～34<sub>3</sub>を用いて信号光波長帯域全体に亘る利得等化を確実に行うことができる。また、上記のような簡略な構成の利得等化器34<sub>1</sub>～34<sub>3</sub>は損失が比較的小さいため、従来のように利得等化器がシステム性能劣化の要因となってしまうことを回避することが可能に

なる。

#### 【0073】

なお、図9の計算例に示した利得等化後の波長特性については、約2.8dBの利得偏差が残留しているが、例えば、各励起光の波長およびパワーのさらなる最適化を図り、また、上述した第1実施形態の構成を併用してラマン利得の極大値が等しい波長間隔で並ぶようにすることで、上記利得偏差の残留分を低減させることが可能である。図10は、第1および第3実施形態を併用した場合の具体的な構成例であり、図11は、図10の構成例における信号光および励起光の波長配置を例示したものである。

#### 【0074】

また、上記の第3実施形態では、信号光波長帯域におけるラマン利得の極小値が略同一となるように励起光パワーを制御する構成について説明したが、本発明はこれに限らず、例えば、ラマン利得の極大値が略同一となるように励起光パワーを制御するようにしてもよい。ただし、極大値を基準にする場合には、各波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>について利得等化後の信号光レベルを揃えるために、利得偏差が小さな波長帯についての利得等化器の損失を大きく設定する必要が生じる。このため、より低損失の利得等化を行うためには、極小値を略同一とするのが望ましい。

#### 【0075】

次に、本発明の第4実施形態について説明する。

上記の第3実施形態では、ラマン増幅されたWDM信号光を複数の波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>に分波して利得等化を行うようにした。第4実施形態では、利得等化の際の帯域分割を行わずに1台の利得等化器を使用して信号光波長帯域全体の一括利得等化を行うことができるようとした応用例について説明する。

#### 【0076】

図12は、第4実施形態のラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

図12において、本実施形態のラマン増幅器の構成が第3実施形態の場合と異なる部分は、第3実施形態において用いられていた励起光パワー制御部31に代えて、信号光波長帯域におけるラマン増幅の利得波長特性の極大点および極小点

が、予め設定した基準利得値を境界とする正の領域および負の領域に略均等に並ぶように、多波長励起光源30で発生する励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>のパワーを制御する励起光パワー制御部31'を設け、これにより利得等化の際の帯域分割を不要して1台の利得等化器36により信号光波長帯域全体の一括利得等化を行うようにした部分である。なお、本実施形態で用いられる多波長励起光源30、光サーチュレータ32および光ファイバ10、並びに、信号光S<sub>1</sub>～S<sub>L</sub>および励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>の波長配置については第3実施形態の場合と同様である。ただし、光ファイバ10を伝搬するWDM信号光については、ラマンシフト周波数と略同じかあるいはそれ以上に対応した波長帯域内に所要の波長間隔で配置された複数の信号光S<sub>1</sub>～S<sub>N</sub>を含む場合に本実施形態の構成は有効となる。

#### 【0077】

図13は、上記のラマン増幅器における利得等化前の利得波長特性の一例について信号光波長帯域（増幅帯域）部分を拡大して示した図である。この利得波長特性は、多波長励起光源30から出力される励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>として、上述の表1に示した場合と同一の条件に設定した13波長の励起光P<sub>1</sub>～P<sub>13</sub>を適用した場合の計算例である。

#### 【0078】

図13に示した計算例では、基準利得値が12dBに設定されており、12dBを超える図で上方の領域が正の領域、12dB未満の図で下方の領域が負の領域とされる。そして、多波長励起光源30で発生する励起光P<sub>1</sub>～P<sub>13</sub>のパワーが励起光パワー制御部31'によって制御されることにより、信号光波長帯域（増幅帯域）におけるラマン利得の極大点および極小点が正の領域および負の領域に略均等に並んだ状態、すなわち、信号光波長帯域についてのラマン利得の平均値が基準利得値と略等しくなる状態が実現されている。次の表4に示すデータは、図13に示したラマン利得の極大値および極小値をまとめたものであり、図14は、表4の各データを横軸を波長、縦軸を利得としてプロットしたものである。

#### 【0079】

【表4】

極大波長 (nm)	極大周波数 (THz)	極大値 (dB)	極小波長 (nm)	極小周波数 (THz)	極小値 (dB)
1300.62	230.50	17.09	1309.71	228.90	8.02
1323.00	226.60	17.16	1335.97	224.40	9.46
1349.20	222.20	14.74	1362.07	220.10	9.45
1378.99	217.40	14.50	1392.44	215.30	10.41
1407.48	213.00	13.92	1422.17	210.80	9.64
1439.23	208.30	14.64	1450.37	206.70	10.02
1466.70	204.40	14.12	1480.46	202.50	9.52
1495.97	200.40	14.34	1513.34	198.10	11.02
1528.77	196.10	12.98	1547.72	193.70	11.00
1566.31	191.40	12.88	1584.53	189.20	11.56
1601.46	187.20	12.50	1621.38	184.90	11.34
1640.90	182.70	12.76	1658.14	180.80	11.64
1672.95	179.20	12.33			

## 【0080】

上記のような利得波長特性についても、前述の図9に示した場合と同様にして、隣り合う極小値と極大値の偏差が同程度となる3つの波長帯B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>を設定することができる(図13)。ただし、本実施形態では、これらの波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>3</sub>ごとに利得等化が行われるのではなく、複数の周期性光フィルタを組み合わせた单一の利得等化器を用いて一括して利得等化が行われる。

## 【0081】

図15は、上記のようなラマン増幅の利得波長特性に対して適用される利得等化器36の損失波長特性および利得等化後の波長特性を求めた計算例である。

図15に示す利得等化器36の損失波長特性(太線)は、例えば、3種類の周期性光フィルタから構成される。具体的には、周期4.6THz、振幅0.92dBおよび中心周波数230.5THzの損失波長特性を有する周期性光フィルタと、周期4.2THz、振幅0.6dBおよび中心周波数230.5THzの損失波長特性を有する周期性光フィルタと、周期4.4THz、振幅1.9dBおよび中心周波数226.6THzの損失波長特性を有する周期性光フィルタと、を組み合わせて利得等化器36を構成することにより、信号光波長帯域の全体

に亘るラマン利得の波長偏差に対応した損失波長特性が実現される。このような利得等化器36を用いてラマン増幅後のWDM信号光の一括利得等化を行うことにより、利得等化後の波長特性は、図15に極太線で示したように信号光波長帯域の全体について、ラマン利得の波長偏差が効果的に低減され、かつ、10dB前後のラマン利得が確保されるようになる。

#### 【0082】

従って、第4実施形態のラマン増幅器によれば、広帯域の信号光をラマン増幅する場合においても、簡略な構成の周期性光フィルタを組み合わせた1台の利得等化器36を用いて信号光波長帯域全体に亘る利得等化を確実に行うことができ、このような利得等化器36は損失が比較的小さいため、従来のように利得等化器がシステム性能劣化の要因となってしまうことを回避することが可能になる。

#### 【0083】

なお、図15の計算例に示した利得等化後の波長特性においても利得偏差が残留しているが、各励起光の波長およびパワーのさらなる最適化を行い、上述した第1実施形態の構成を併用してラマン利得の極大値が等しい波長間隔で並ぶようにすることで、上記利得偏差の残留分を低減させることが可能である。

#### 【0084】

次に、本発明の第5実施形態について説明する。

上述した第1～第4実施形態において、信号光および励起光がある波長帯域内で混在するような波長配置が適用される場合、光ファイバ10に供給される励起光のレーリ散乱光が合波部12（光サーキュレータ32）を通過してWDM信号光と共に後段側に伝わるようになる。このレーリ散乱光はWDM信号光の波長帯域内にも存在するためWDM信号光を伝送する過程で累積し、システム性能を劣化させる可能性がある。このようなレーリ散乱光による性能劣化を防ぐためには、レーリ散乱光を除去するための光フィルタの適用が有効であることを本出願人は提案している（例えば、特願2001-390366号参照）。そこで、第5実施形態では、上記のようなレーリ散乱光除去用の光フィルタを適用した改良例について説明する。

#### 【0085】

図16は、第5実施形態のラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

図16において、本実施形態のラマン増幅器は、例えば、上述の図7に示した第3実施形態の構成について、光サーキュレータ32と分波器33の間にレーリ散乱光を除去するための光フィルタ40を設けたものである。

#### 【0086】

光フィルタ40は、例えば図17に示すように、励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>の各中心波長に対応した波長で透過率が急峻に低下する周期性ノッチフィルタを用いることが可能である。

#### 【0087】

上記のような構成のラマン増幅器では、多波長励起光源30から光サーキュレータ32を介して光ファイバ10に供給された励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>のレーリ散乱光がWDM信号光S<sub>1</sub>～S<sub>L</sub>と共に光サーキュレータ32を通過して光フィルタ40に入力される。光フィルタ40では、各励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>に一致した波長を持つレーリ散乱光の通過が阻止され、各励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>とは異なる波長に配置されたWDM信号光のみが分波器33に送られるようになる。これにより、励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>のレーリ散乱光が後段側に伝達されることがなくなるため、システム性能の改善を図ることが可能になる。

#### 【0088】

さらに、励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>の周波数間隔が、ラマンシフト周波数の（整数+1／2）分の1に設定されている場合には、図18に示すように、分波器33の透過率が極小となる損失ピーク周波数（図18の上段）が、レーリ散乱光除去用の光フィルタ40の透過率が極小となる損失ピーク周波数（図18の下段）に一致するようになるため、ラマン増幅器の増幅帯域を有効に活用しつつ、レーリ散乱光の抑圧と波長帯B<sub>1</sub>～B<sub>n</sub>ごとの利得等化を行うことが可能になる。

#### 【0089】

なお、上記の第5実施形態では、図7に示した第3実施形態の構成についてレーリ散乱光除去用の光フィルタ40を設けた一例を示したが、第3実施形態以外の他の実施形態の構成についても同様にしてレーリ散乱光除去用の光フィルタを適用することが可能である。

### 【0090】

また、上記の第5実施形態の応用例として、レーリ散乱光除去用の光フィルタに利得等化の機能を具備させて、レーリ散乱光の除去と利得等化とを同一の光フィルタにより行うようにすることも可能である。図19は、上記のような光フィルタの透過波長特性の要部を拡大して示した図である。図19に示すように、励起光の中心波長に対応する波長で透過率が急峻に低下し、その前後に位置する信号光帯域ではラマン利得の波長特性に対応した形状で透過率が変化するような特性を持つ光フィルタが実現されれば、上記のようなレーリ散乱光除去および利得等化の一括処理を行うことができる。

### 【0091】

さらに、上記の第5実施形態の他の応用例として、図20の要部構成に示すように、励起光近傍の波長域のみを透過する特性を備えた光フィルタ41を用いて、多波長励起光源30から出力される励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>を光ファイバ10（増幅媒体）に与えるようにすることも有効である。図21は、上記のような光フィルタ41についての波長に対する反射率の変化の好ましい具体例を示したものである。図21に示したような波長特性を有する光フィルタ41を用いれば、多波長励起光源30から光フィルタ10に与えられる各励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>のスペクトルを狭窄化することができ、また、各励起光P<sub>1</sub>～P<sub>M</sub>の中心波長の中間に位置する波長域の反射特性がラマン利得のプロファイルと逆の特性となっているため、ラマン増幅された信号光S<sub>1</sub>～S<sub>N</sub>の利得等化も同時に実現することができる。さらに、光ファイバ10内で発生したレーリ散乱光は、再び光フィルタ41を通過して後段側には伝えられないため、光フィルタ41によってレーリ散乱光を除去することができる。従って、励起光スペクトルの狭窄化によるシステム性能の改善と同時に、ラマン増幅器の構成の簡略化および低損失化とを実現することが可能になる。

### 【0092】

次に、本発明の第6実施形態について説明する。

図22は、本発明の第6実施形態による光伝送システムの構成を示すブロック図である。

### 【0093】

図22において、本光伝送システムは、例えば、光送信局50および光受信局51の間を接続する光伝送路52上に複数の光中継局53が配置され、光送信局50から光伝送路52に送出されたWDM信号光を各光中継局53で増幅しながら光受信局51まで中継伝送するシステムについて、各々の光中継局53が上述した第1～第5実施形態のうちのいずれかのラマン増幅器を含んで構成されたものである。ここでは、各光中継局53の間を繋ぐ光伝送路がラマン増幅用の増幅媒体として利用される。

### 【0094】

光送信局50は、複数の光送信器（E/O）50Aで発生する波長の異なる信号光を合波器50Bで合波してWDM信号光を生成し、そのWDM信号光をポストアンプ50Cで所要のレベルまで増幅して光伝送路52の送出する。また、光受信局51は、光送信局50から光伝送路52および各光中継局53を介して中継伝送されたWDM信号光をプリアンプ51Aで所要のレベルまで増幅した後に分波器51Bで各波長の信号光に分波し、各々の波長に対応した光受信器（O/E）で信号光の受信処理を行う。

### 【0095】

上記のような光伝送システムでは、光送信局50から光伝送路52に送信されたWDM信号光が各中継区間の光伝送路52を伝搬してラマン増幅されながら光受信局まで中継伝送される。このとき、各中継区間におけるラマン利得の波長特性に応じてWDM信号光に生じる波長間のパワー偏差は簡略な構成で低損失の利得等化器によって等化されるようになるため、優れたシステム性能を実現することが可能になる。

### 【0096】

なお、上記第6実施形態の光伝送システムについては、例えば図23に示すように、各中継区間で等化しきれずに残留した利得偏差の累積分を所要の中継数ごとにまとめて補償する利得等化器54を、各光中継局53のラマン増幅器内の利得等化器とは別に設けるようにしてもよい。これにより、システム性能のさらなる向上を図ることが可能になる。

**【0097】**

以上、本明細書で開示した主な発明について以下にまとめる。

**【0098】**

(付記1) 波長の異なる複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第1励起光発生部と、

該第1励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された1波長以上の励起光を発生する第2励起光発生部と、

前記第1および第2励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記増幅媒体に供給する合波部と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0099】**

(付記2) 付記1に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン増幅された波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器を備えたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0100】**

(付記3) 付記1に記載のラマン増幅器であって、

前記増幅媒体を伝搬してラマン増幅された波長多重信号光パワーの波長特性をモニタするモニタ部と、

該モニタ部のモニタ結果を基に判断される信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の変化に応じて、前記第2励起光発生部で発生する励起光の波長およびパワーの少なくとも一方を制御する制御部と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0101】**

(付記4) 付記1に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域がラマンシフト周波数に対応した波長幅よりも狭く、信号光波長帯域および励起光波長帯域が分かれた波長配置が適用されたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0102】**

(付記5) 付記1に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域がラマンシフト周波数と略同じかあるいはそれ以上に対応した波長幅であり、励起光が信号光波長帯域内に混在する波長配置が適用されたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0103】**

(付記6) 付記5に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0104】**

(付記7) 付記5に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン利得の波長偏差を低減すると同時に、信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0105】**

(付記8) 付記5に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン利得の波長偏差を低減すると同時に、励起光のスペクトルを狭窄化する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0106】**

(付記9) 付記1に記載のラマン増幅器を備えて構成されたことを特徴とする光伝送システム。

**【0107】**

(付記 10) 付記 9 に記載の光伝送システムであって、  
前記ラマン増幅器が、光端局間を接続する光伝送路上に配置された複数の光中  
継局にそれぞれ設けられたことを特徴とする光伝送システム。

#### 【0108】

(付記 11) 付記 10 に記載の光伝送システムであって、  
各中継区間で利得等化されずに残留したラマン利得の波長偏差を複数の中継区  
間ごとに補償する利得等化器を備えたことを特徴とする光伝送システム。

#### 【0109】

(付記 12) ラマンシフト周波数の略 2 倍あるいはそれ以上に対応した波長帯域  
内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励  
起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であつ  
て、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応し  
た波長幅に従って短波長側にシフトした帶域内に配置された複数の励起光を発生  
する励起光源と、

信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極小値および極大値のいずれ  
かが略同一となるように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励  
起光パワー制御部と、

前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと  
、  
前記増幅媒体を伝搬してラマン増幅された波長多重信号光を、ラマン利得の波  
長偏差に応じて予め設定した複数の波長帯に分波する分波器と、

該分波器で分波された波長多重信号光のパワーの波長偏差を前記波長帯ごとに  
低減する複数の利得等化器と、

該各利得等化器から出力される信号光を合波する合波器と、を備えて構成され  
たことを特徴とするラマン増幅器。

#### 【0110】

(付記 13) 付記 12 に記載のラマン増幅器であって、  
前記複数の波長帯は、信号光波長帯域におけるラマン利得の波長偏差が略同じ

になる範囲を1つの波長帯としたことを特徴とするラマン増幅器。

#### 【0111】

(付記14) 付記12に記載のラマン増幅器であって、

前記励起光源は、信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第1励起光発生部と、

該第1励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された1波長以上の励起光を発生する第2励起光発生部と、

前記第1および第2励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記光サーチュレータに送る合波器と、を有することを特徴とするラマン増幅器。

#### 【0112】

(付記15) 付記12に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

#### 【0113】

(付記16) 付記15に記載のラマン増幅器であって、

前記複数の波長帯の境界に設定された前記分波器のガードバンドの中心波長と、励起光の中心波長に対応させて設定された前記光フィルタの損失ピーク波長とを一致させたことを特徴とするラマン増幅器。

#### 【0114】

(付記17) 付記12に記載のラマン増幅器を備えて構成されたことを特徴とする光伝送システム。

#### 【0115】

(付記18) 付記17に記載の光伝送システムであって、

前記ラマン増幅器が、光端局間を接続する光伝送路上に配置された複数の光中継局にそれぞれ設けられたことを特徴とする光伝送システム。

#### 【0116】

(付記19) 付記18に記載の光伝送システムであって、各中継区間で利得等化されずに残留したラマン利得の波長偏差を複数の中継区間ごとに補償する利得等化器を備えたことを特徴とする光伝送システム。

### 【0117】

(付記20) ラマンシフト周波数と略同じかあるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であつて、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、

信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極大点および極小点が、予め設定した基準利得値を境界とする正の領域および負の領域に略均等に並ぶように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと、

信号光波長帯域の全体に亘って波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

### 【0118】

(付記21) 付記20に記載のラマン増幅器であって、

前記励起光源は、信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第1励起光発生部と、

該第1励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された1波長以上の励起光を発生する第2励起光発生部と、

前記第1および第2励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記光サーキュレータに送る合波器と、を有することを特徴とするラマン増幅器。

**【0119】**

(付記22) 付記20に記載のラマン増幅器であって、  
信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備  
えたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0120】**

(付記23) 付記20に記載のラマン増幅器であって、  
信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有  
し、ラマン利得の波長偏差を低減すると同時に、信号光波長帯域内に混在する励  
起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅  
器。

**【0121】**

(付記24) 付記20に記載のラマン増幅器であって、  
信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有  
し、ラマン利得の波長偏差を低減すると同時に、励起光のスペクトルを狭窄化す  
る光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

**【0122】**

(付記25) 付記20に記載のラマン増幅器を備えて構成されたことを特徴とす  
る光伝送システム。

**【0123】**

(付記26) 付記25に記載の光伝送システムであって、  
前記ラマン増幅器が、光端局間を接続する光伝送路上に配置された複数の光中  
継局にそれぞれ設けられたことを特徴とする光伝送システム。

**【0124】**

(付記27) 付記26に記載の光伝送システムであって、  
各中継区間で利得等化されずに残留したラマン利得の波長偏差を複数の中継区  
間にごとに補償する利得等化器を備えたことを特徴とする光伝送システム。

**【0125】****【発明の効果】**

以上説明したように、本発明のラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システ

ムによれば、簡略な構成で低損失の利得等化器を利用して、ラマン増幅された波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減することができるため、システム性能の改善を図ることが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図2】第1実施形態における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図3】第1実施形態における多波長励起光源の具体的な構成例を示すブロック図である。

【図4】第1実施形態における利得等化器の透過波長特性の一例を示す図である。

【図5】第1実施形態により実現される利得波長特性の具体例を示す図である。

【図6】本発明の第2実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図7】本発明の第3実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図8】第3実施形態における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図9】第3実施形態により実現される利得波長特性の具体例を示す図である。

【図10】第1および第3実施形態を併用した場合の具体的な構成を示すブロック図である。

【図11】図10の構成における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図12】本発明の第4実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図13】第4実施形態における利得等化前のラマン利得の波長特性を示す

図である。

【図14】図13におけるラマン利得の極大値および極小値の分布を示す図である。

【図15】第4実施形態により実現される利得波長特性の具体例を示す図である。

【図16】本発明の第5実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図17】第5実施形態においてレーリ散乱光を除去するための光フィルタの透過波長特性の一例を示す図である。

【図18】第5実施形態における分波器および光フィルタの好ましい透過波長特性の一例を示す図である。

【図19】第5実施形態の応用例においてレーリ散乱光の除去および利得等化の機能を具備した光フィルタの透過波長特性を示す図である。

【図20】第5実施形態の他の応用例の要部構成を示すブロック図である。

【図21】図20における光フィルタの反射率の波長特性を示す図である。

【図22】本発明の第6実施形態による光伝送システムの構成を示すブロック図である。

【図23】第6実施形態に関連した他の構成例を示すブロック図である。

【図24】従来のラマン増幅器の構成例を示す図である。

【図25】図24のラマン増幅器における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図26】図24のラマン増幅器に対して利得等化器を適用した構成例を示す図である。

【図27】従来のラマン増幅器の他の構成例を示す図である。

【図28】図27のラマン増幅器における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図29】励起光間に生じるラマン増幅の効率を低くする励起光の変調方式を説明するための図である。

【図30】複数の励起光を用いて得られるラマン利得の波長特性を説明する

ための図である。

【図31】不等間隔の励起光を用いたときに得られるラマン利得のプロファイルと、それに対応した利得等化器の損失波長特性を示す図である。

【図32】単一の波長の励起光を信号光波長帯域内に配置した一例を示す図である。

【図33】図32の波長配置において得られるラマン利得の波長特性を示す図である。

【図34】ラマンシフト周波数の約4倍となる増幅帯域幅を有するラマン増幅器について計算した利得波長特性の一例を示す図である。

【図35】図34におけるラマン利得の極大値および極小値の分布を示す図である。

【図36】図34の利得波長特性のうちの増幅帯域部分を拡大した図である。

【図37】図36利得波長特性に対して周期的な損失特性を有する光フィルタを適用して利得等化を行った場合の一例を示す図である。

#### 【符号の説明】

10 光ファイバ

11, 30 多波長励起光源

12 合波部

13, 34<sub>1</sub> ~ 34<sub>n</sub>, 36, 54 利得等化器

14 光カプラ

15 モニタ部

16 制御部

20 第1励起光発生部

21 第2励起光発生部

22, 35 合波器

31 励起光パワー制御部

32 光サーキュレータ

33 分波器

4 0 , 4 1 光フィルタ

5 0 光送信局

5 1 光受信局

5 2 光伝送路

5 3 光中継局

S<sub>1</sub> ~ S<sub>L</sub> 信号光

P<sub>1</sub> ~ P<sub>K</sub> 第1励起光

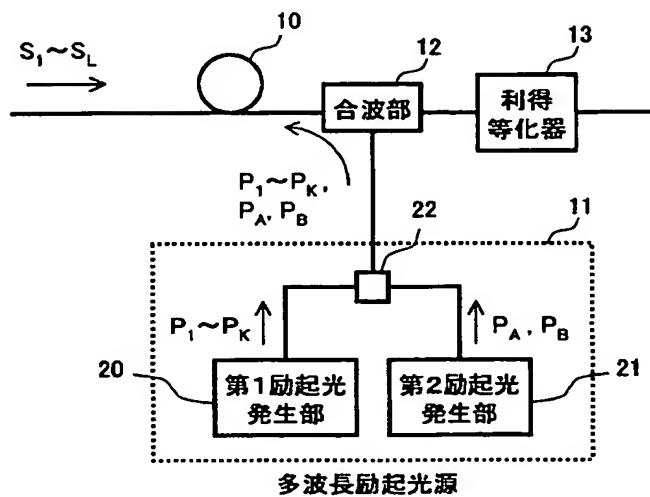
P<sub>A</sub>, P<sub>B</sub> 第2励起光

【書類名】

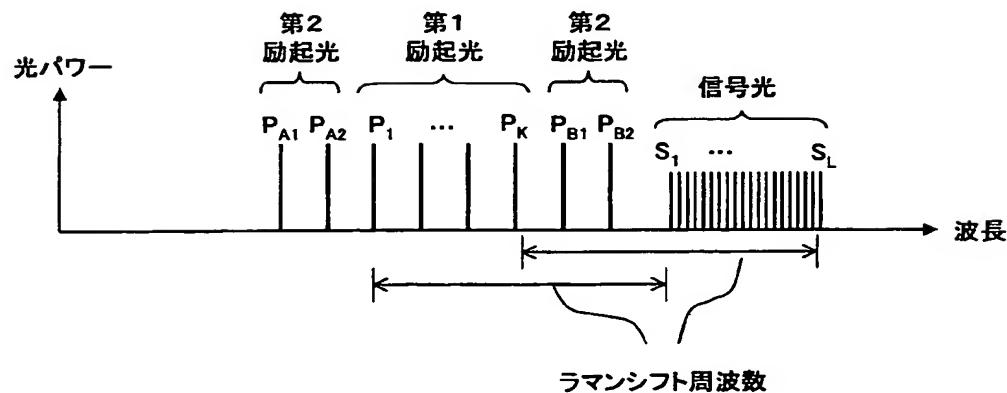
図面

【図 1】

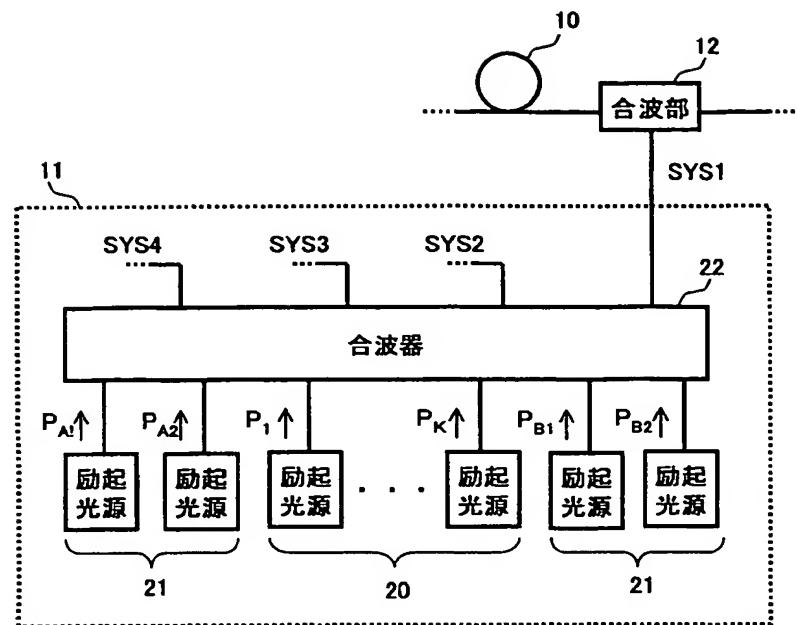
本発明の第1実施形態のラマン増幅器



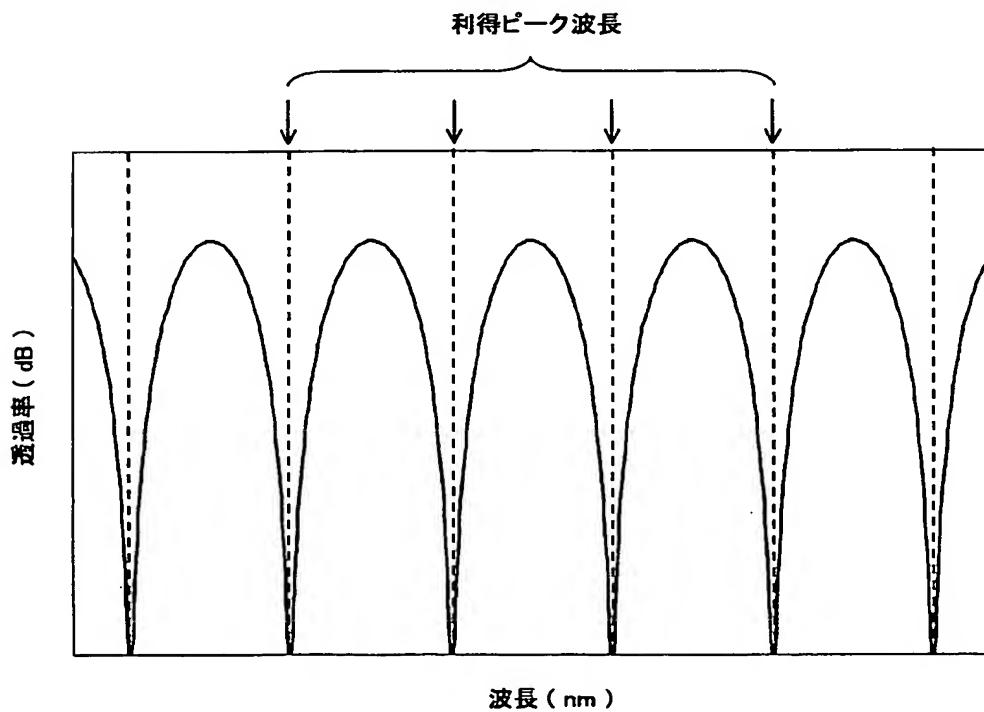
【図 2】



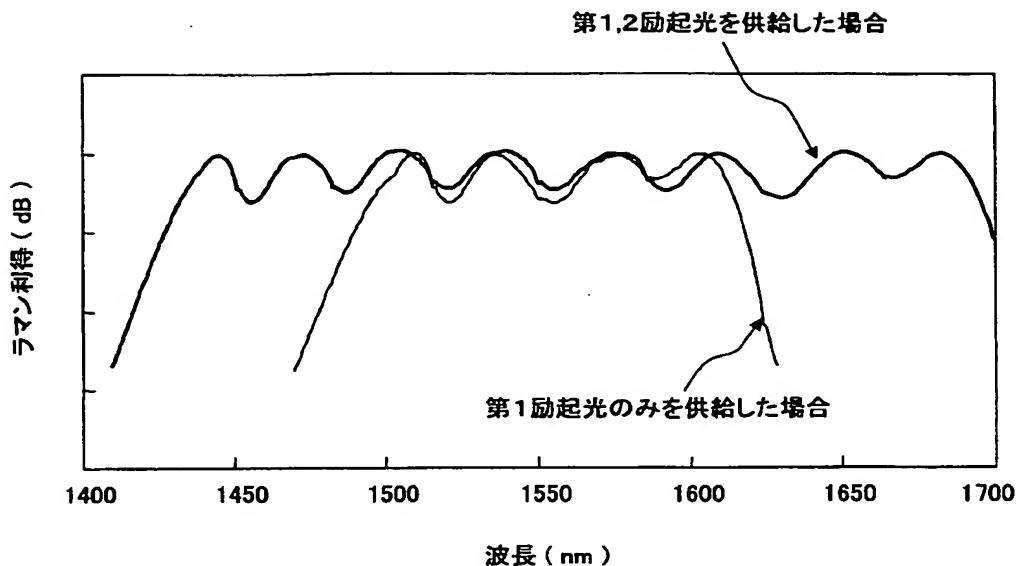
【図 3】



【図 4】

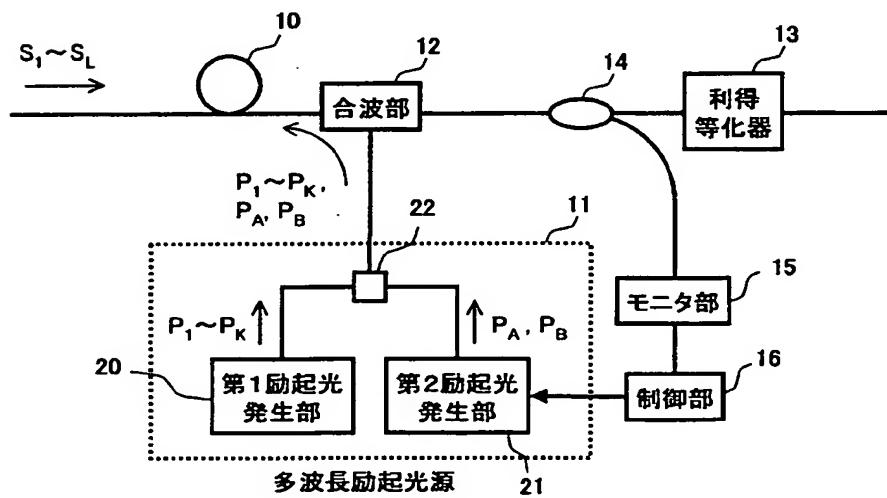


【図 5】



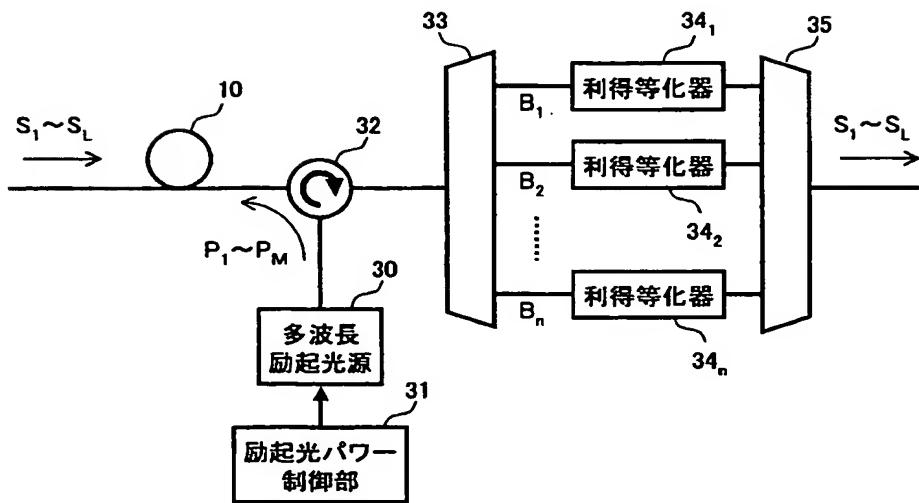
【図 6】

本発明の第2実施形態のラマン増幅器

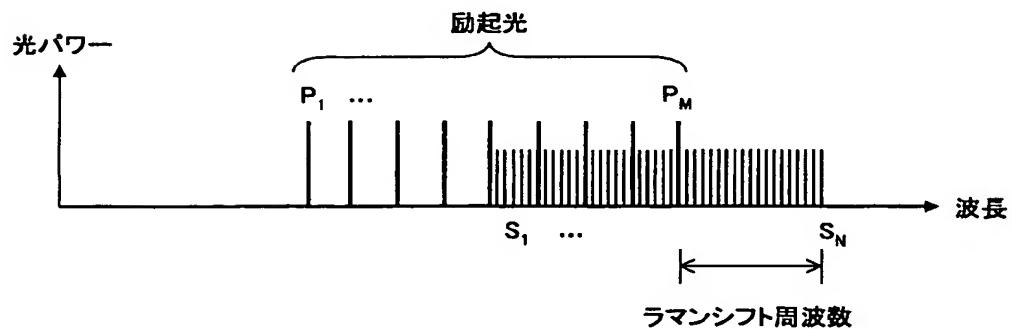


【図7】

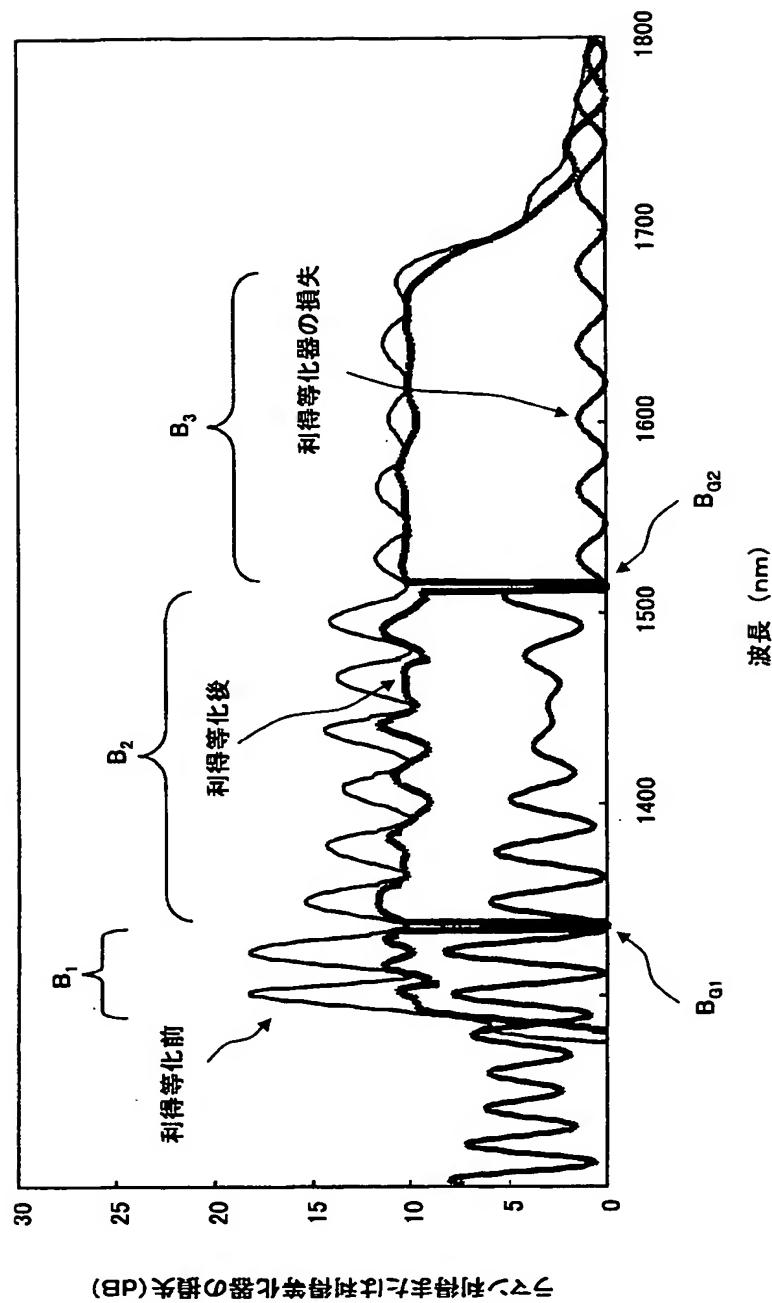
本発明の第3実施形態のラマン増幅器



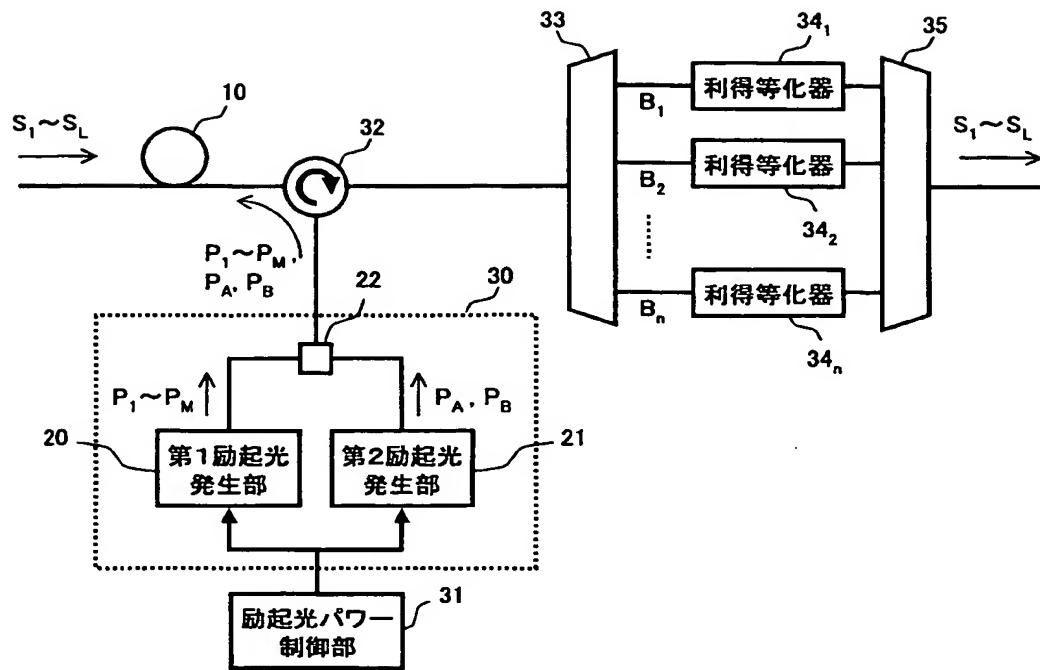
【図8】



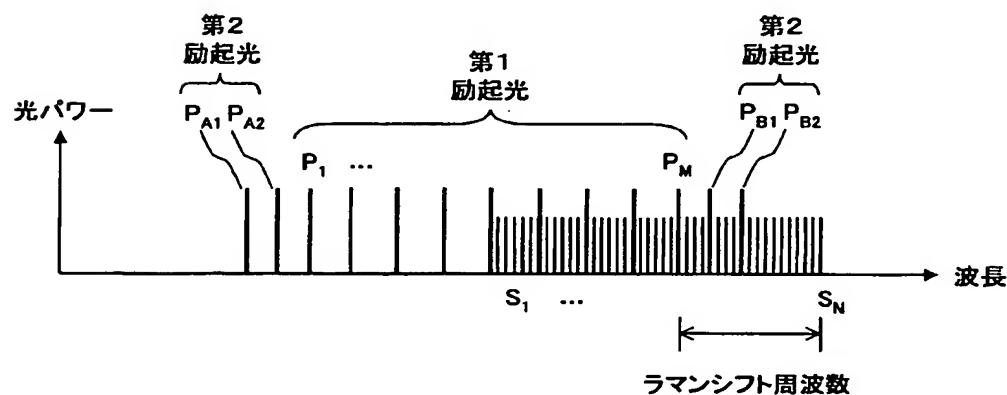
【図9】



【図10】

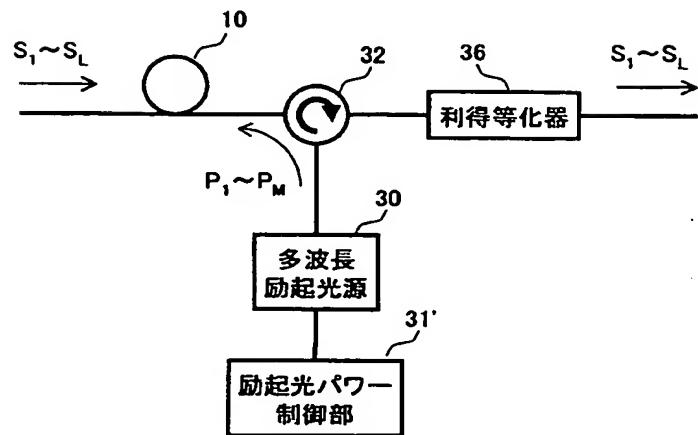


【図11】

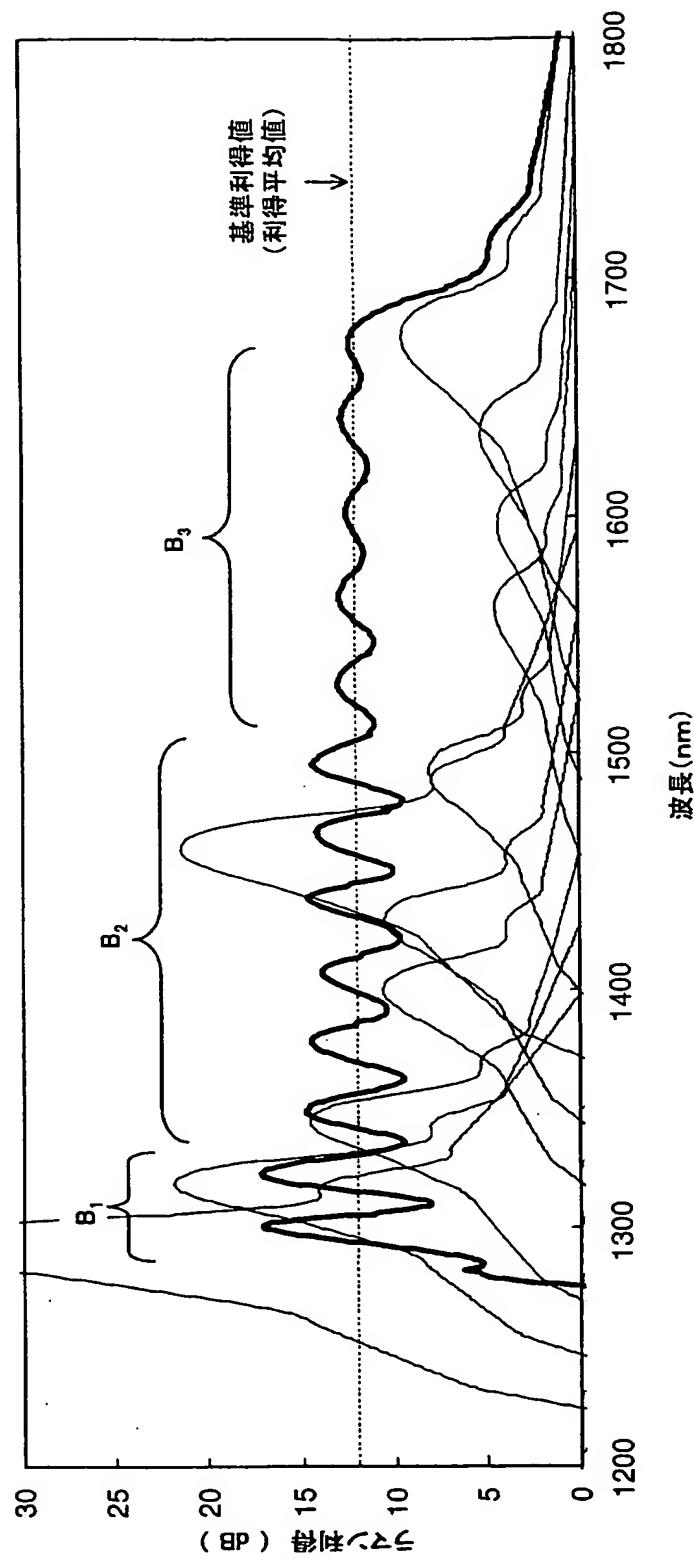


【図12】

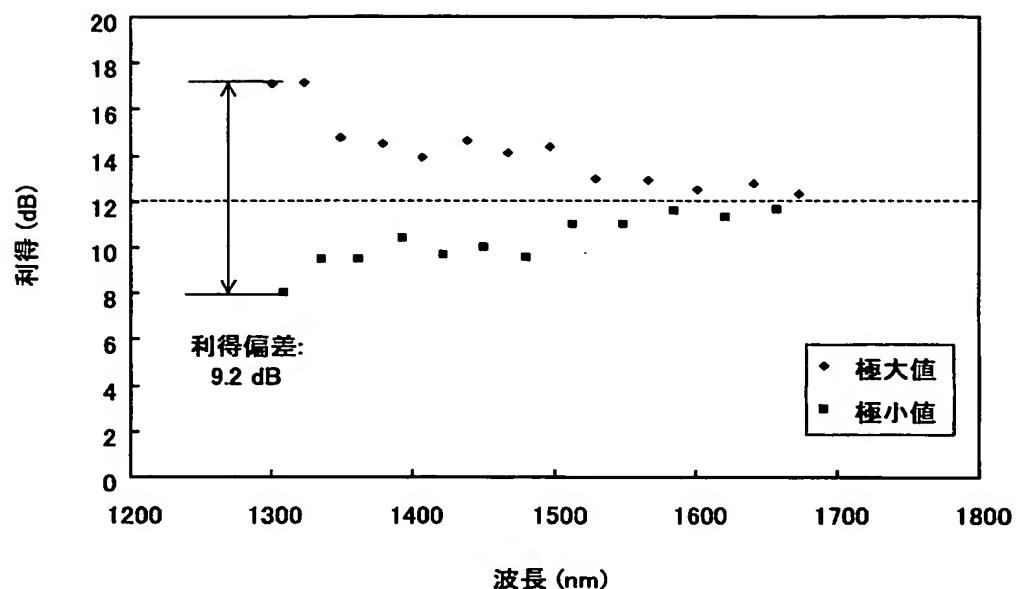
## 本発明の第4実施形態のラマン増幅器



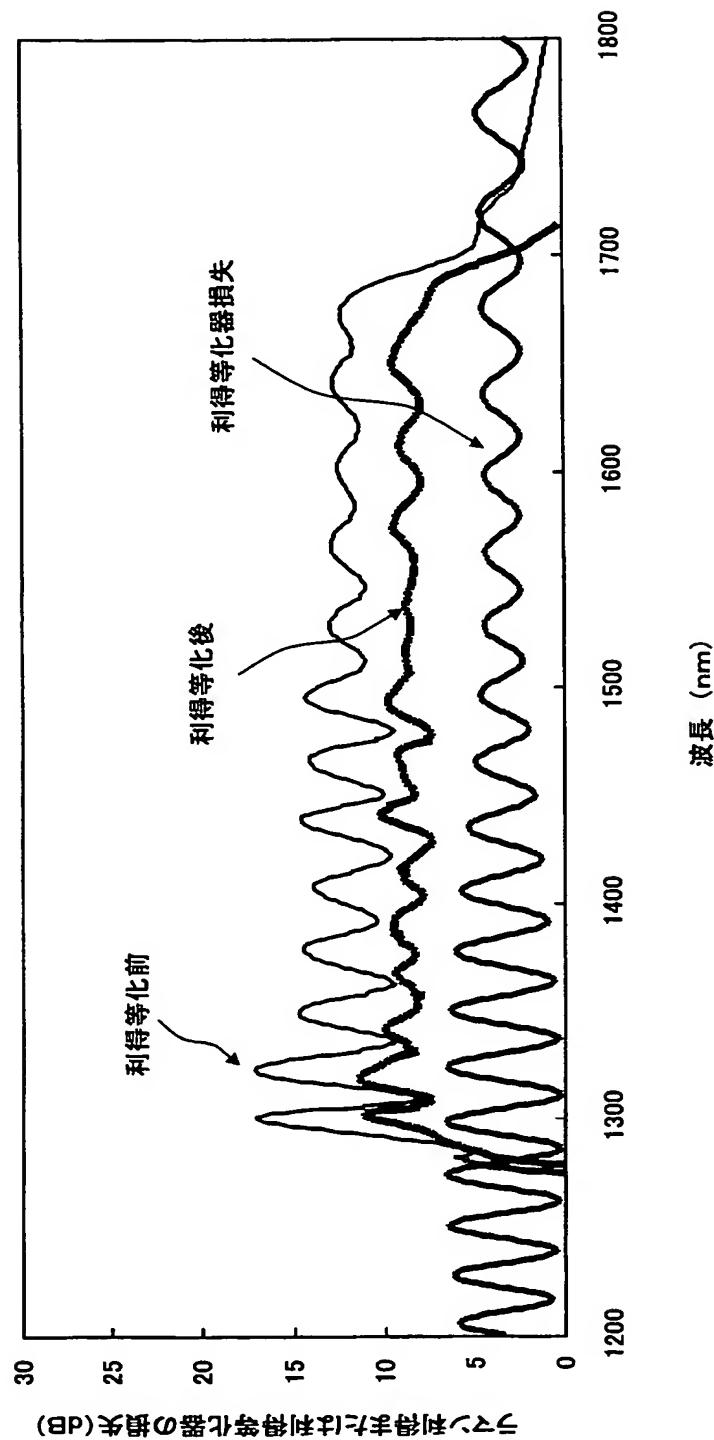
【図13】



【図14】

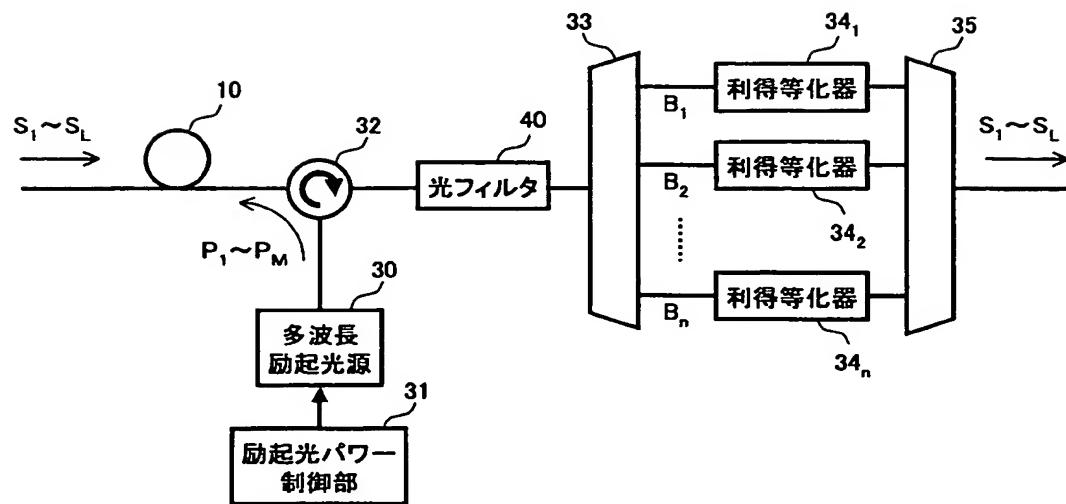


【図15】

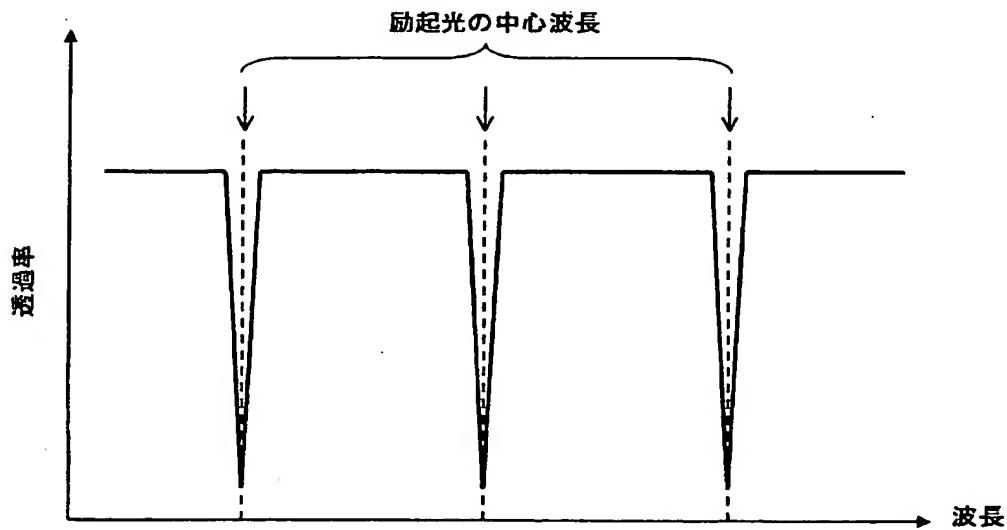


【図 16】

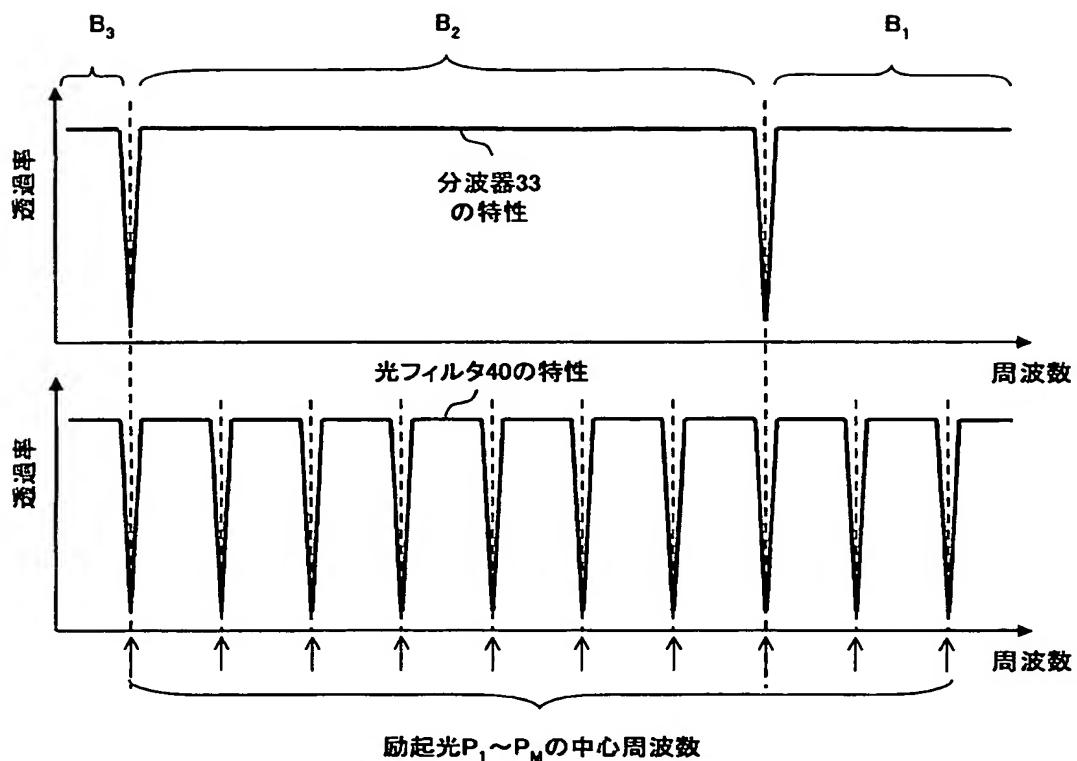
本発明の第5実施形態のラマン増幅器



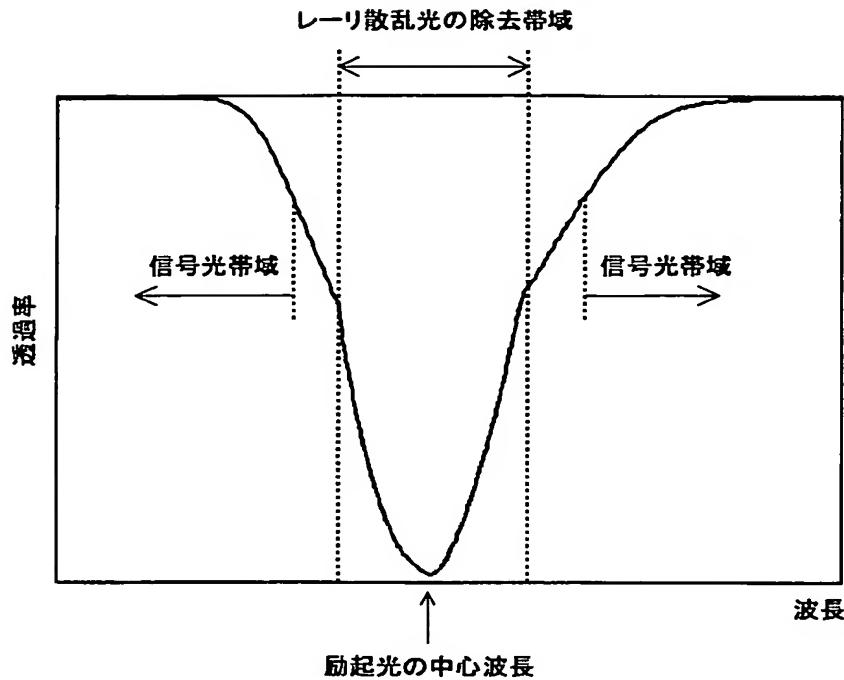
【図 17】



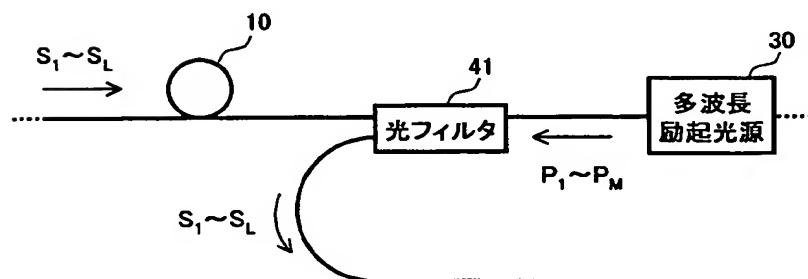
【図18】



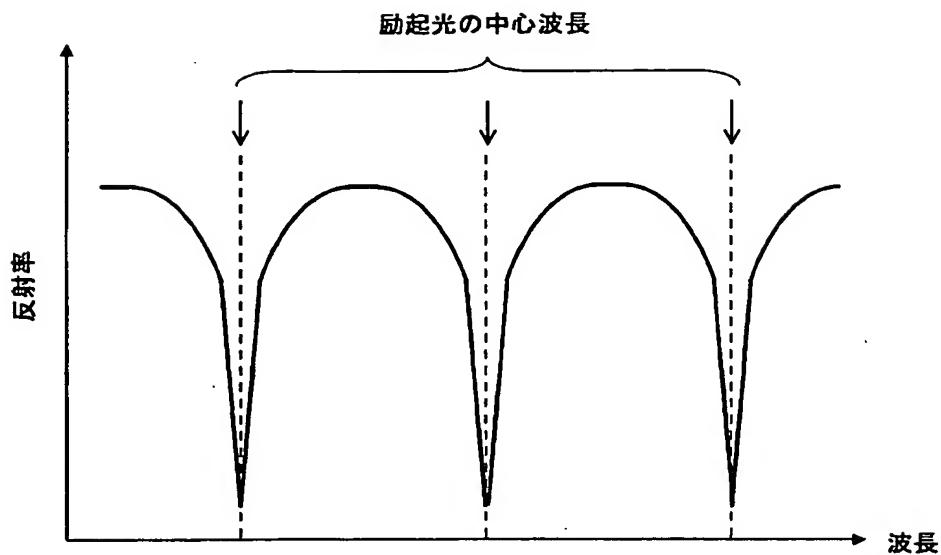
【図19】



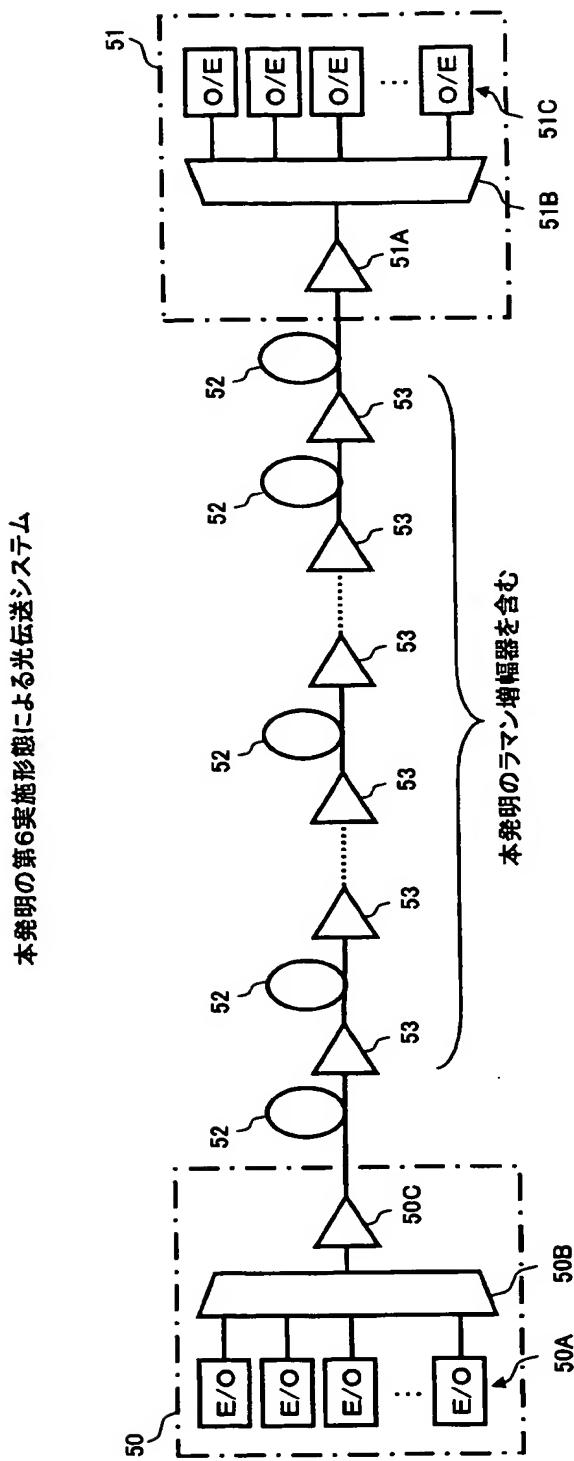
【図20】



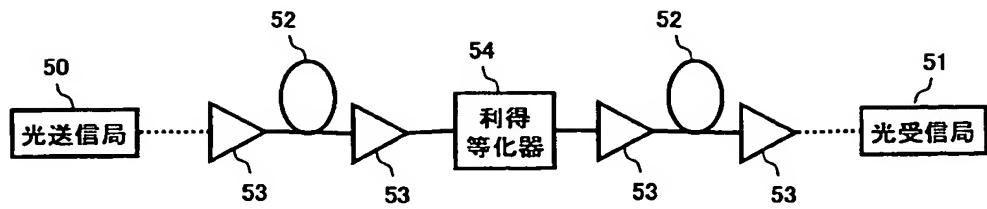
【図21】



【図22】

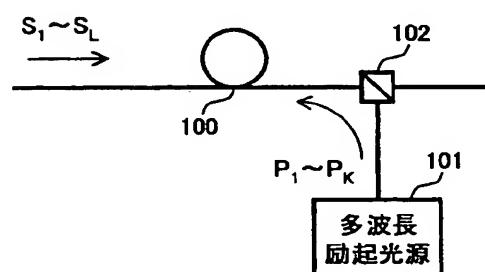


【図 2 3】



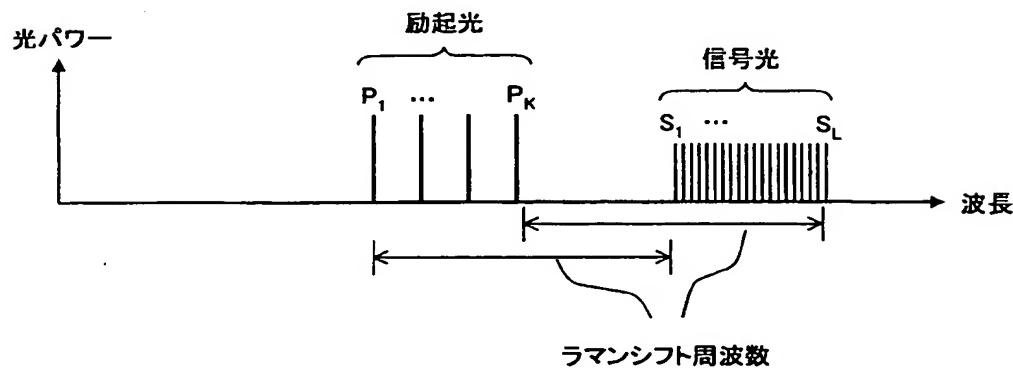
【図 2 4】

従来のラマン増幅器の構成例



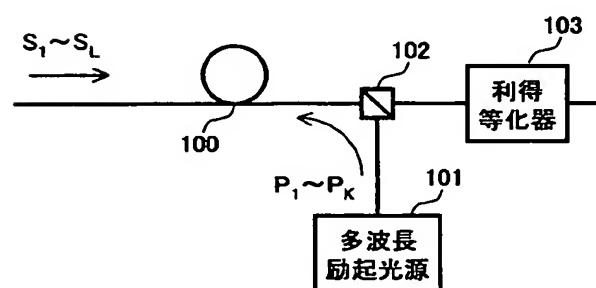
【図25】

従来のラマン増幅器における波長配置例



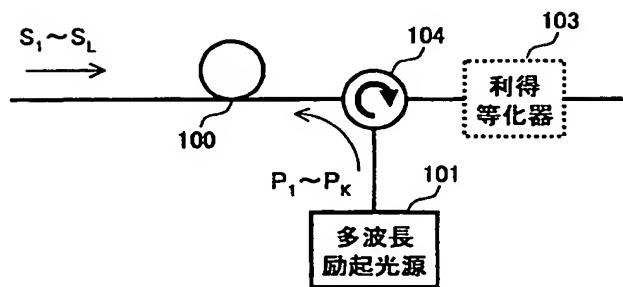
【図26】

従来のラマン増幅器の他の構成例



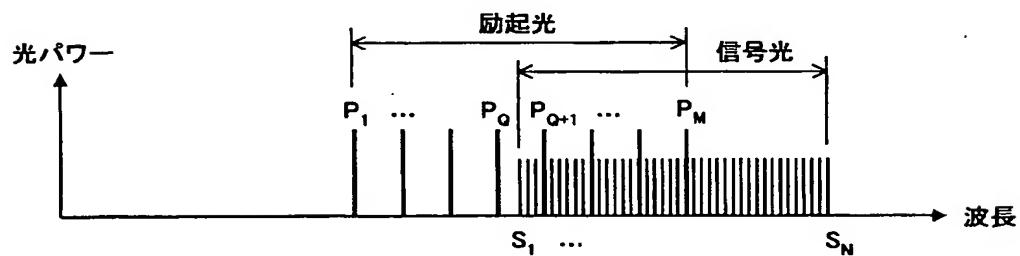
【図 27】

従来のラマン増幅器の他の構成例



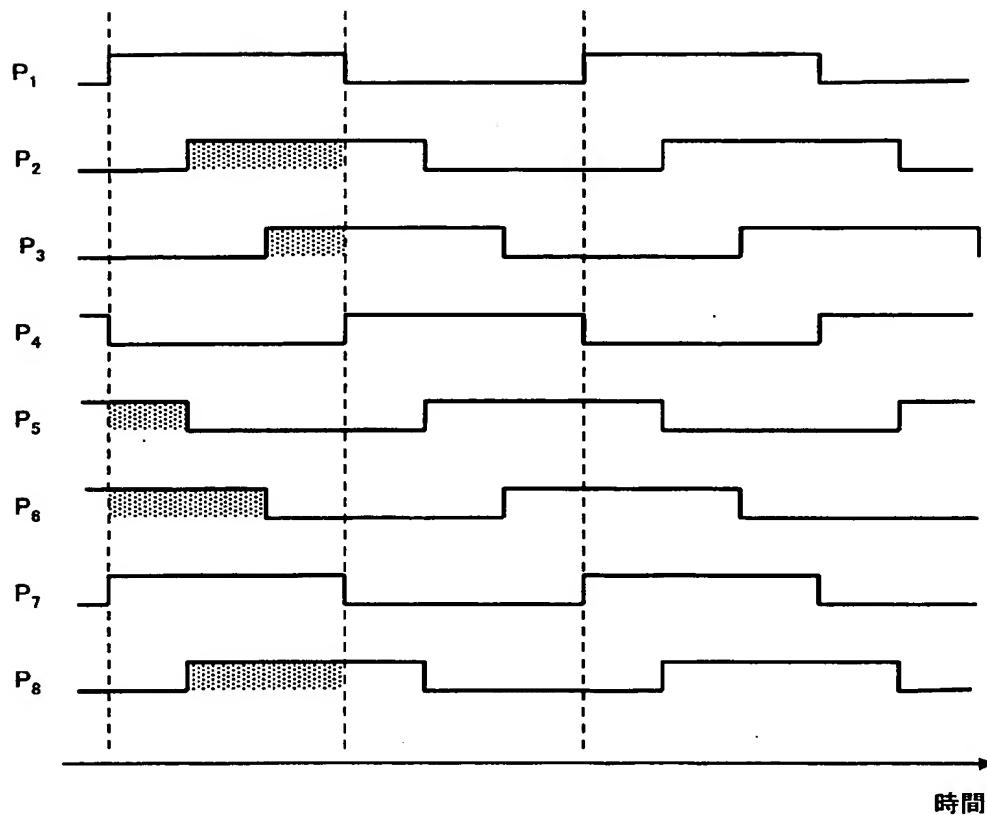
【図 28】

従来のラマン増幅器における他の波長配置例

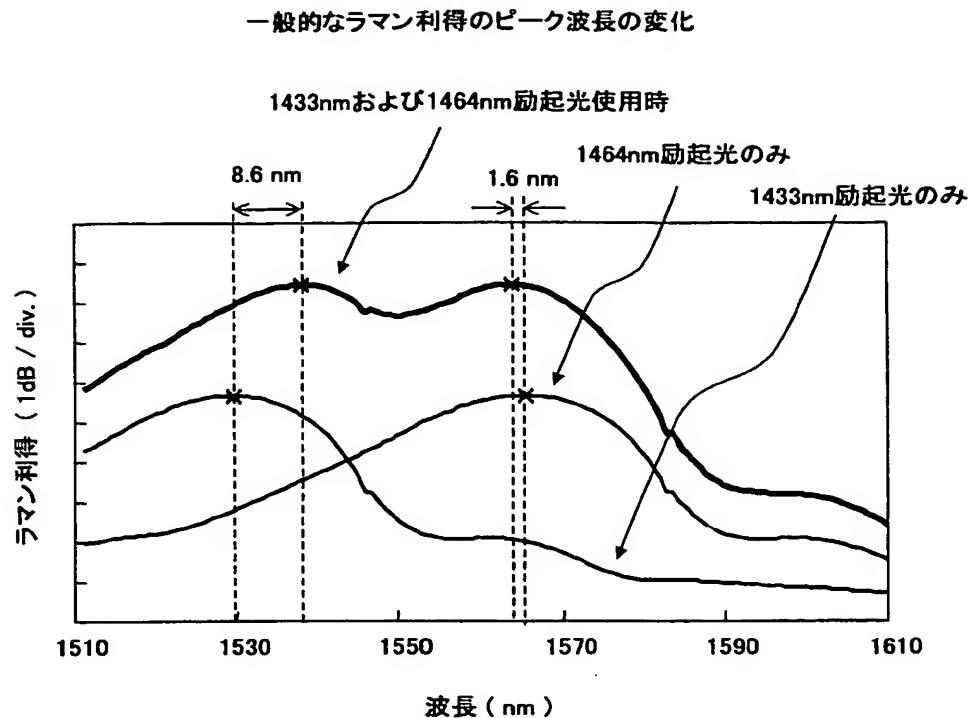


【図29】

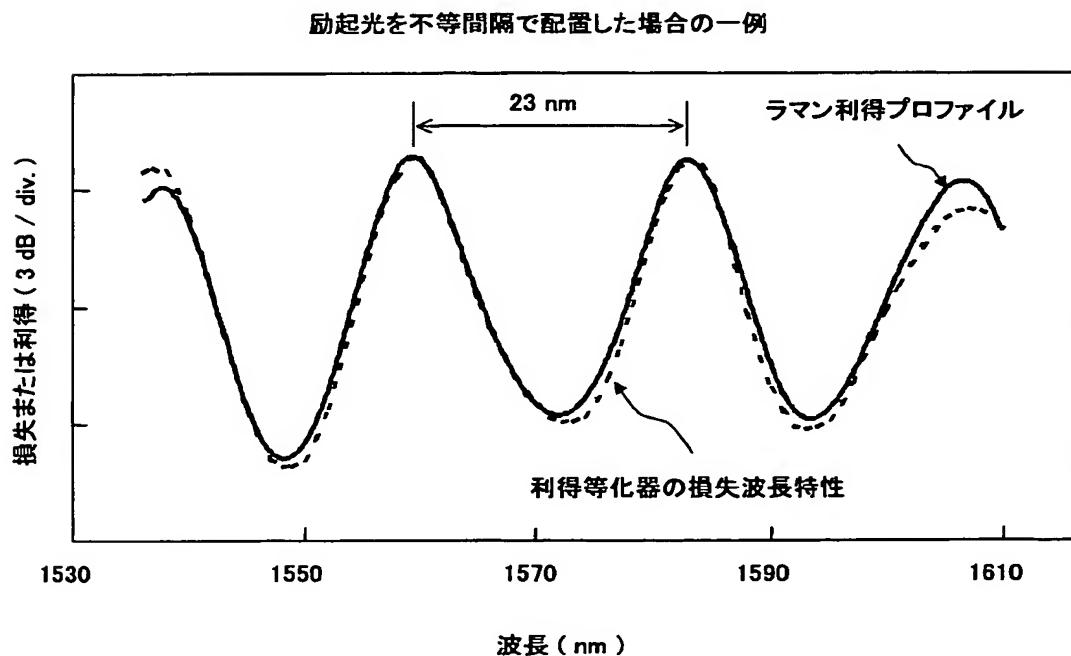
## 励起光の変調方式の一例



【図30】

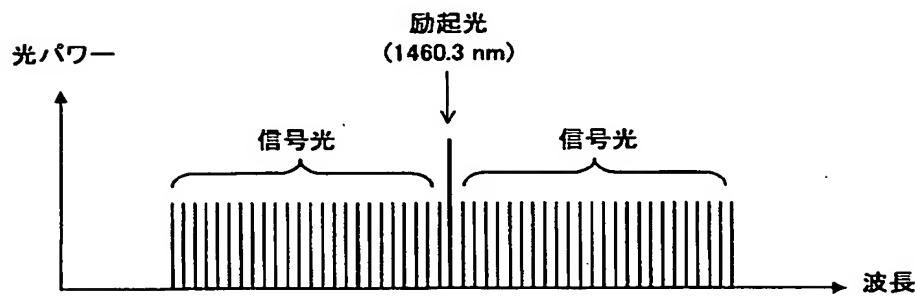


【図31】



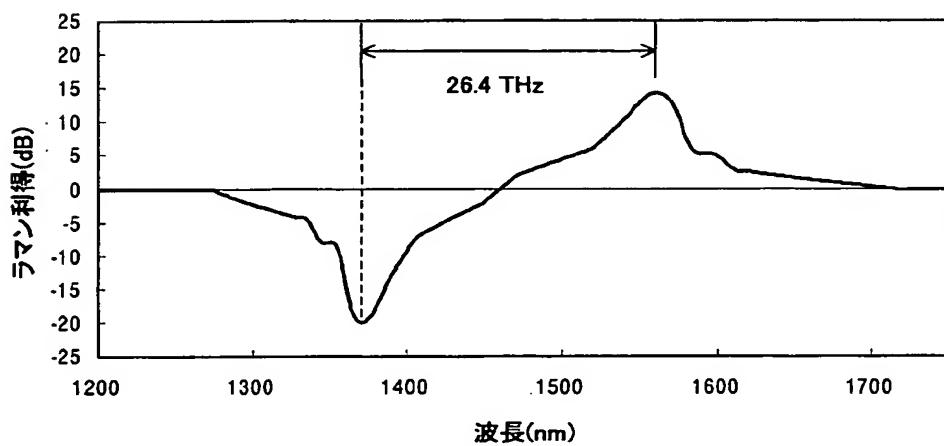
【図32】

单一の励起光が信号光帯域内に混在する波長配置の一例



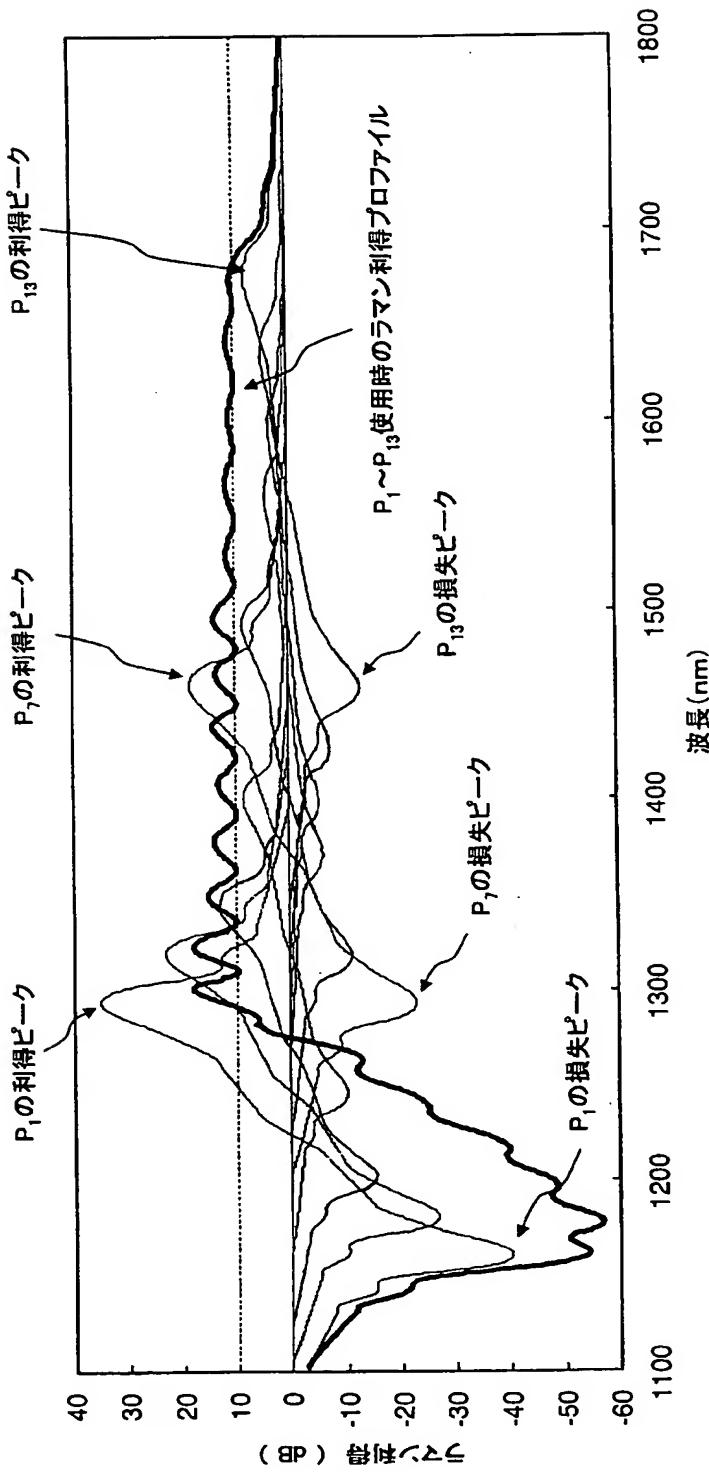
【図33】

1460.3 nmの励起光によるラマン効果



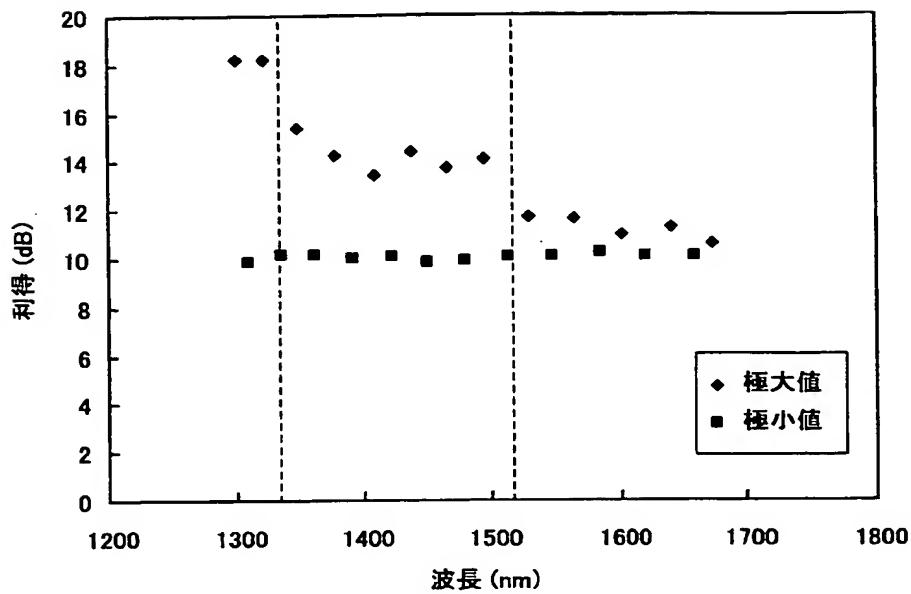
【図34】

ラマンシフト周波数の約4倍の増幅帯域幅を有する  
従来のラマン增幅器の利得波長特性の一例



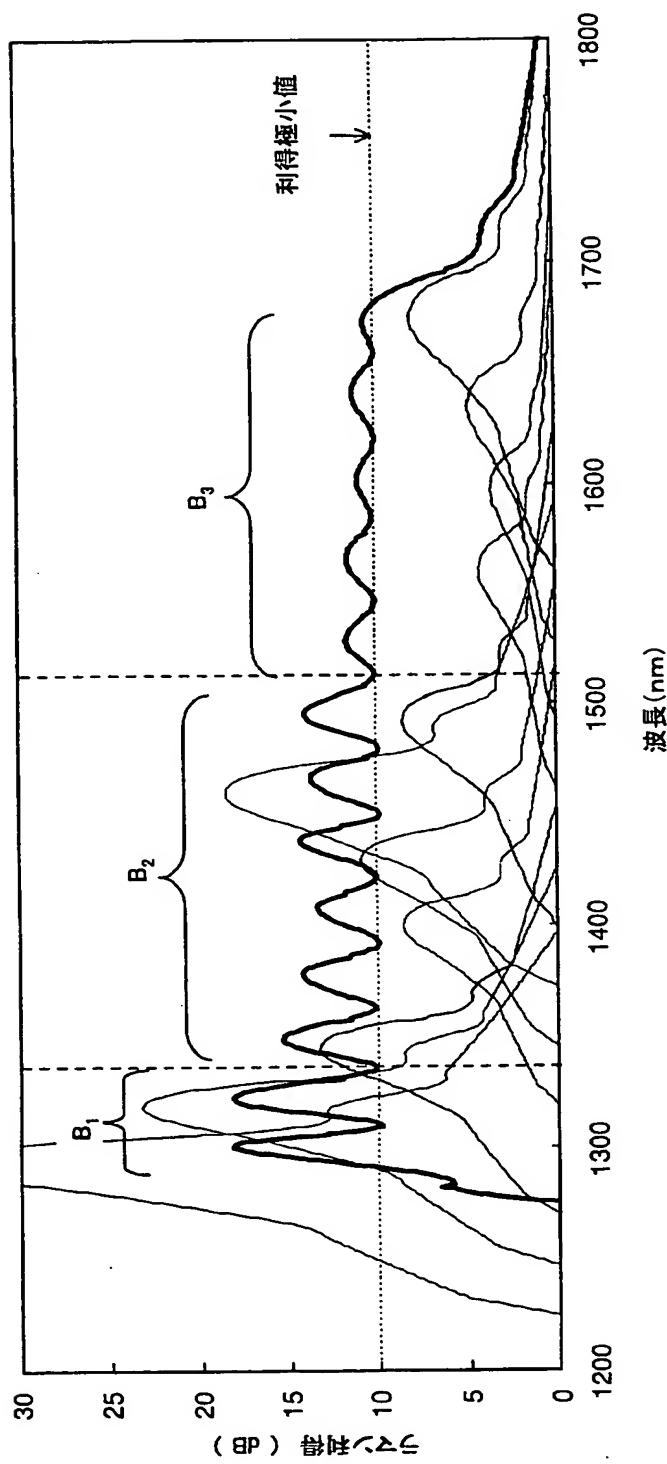
【図35】

従来のラマン増幅器における利得偏差の一例



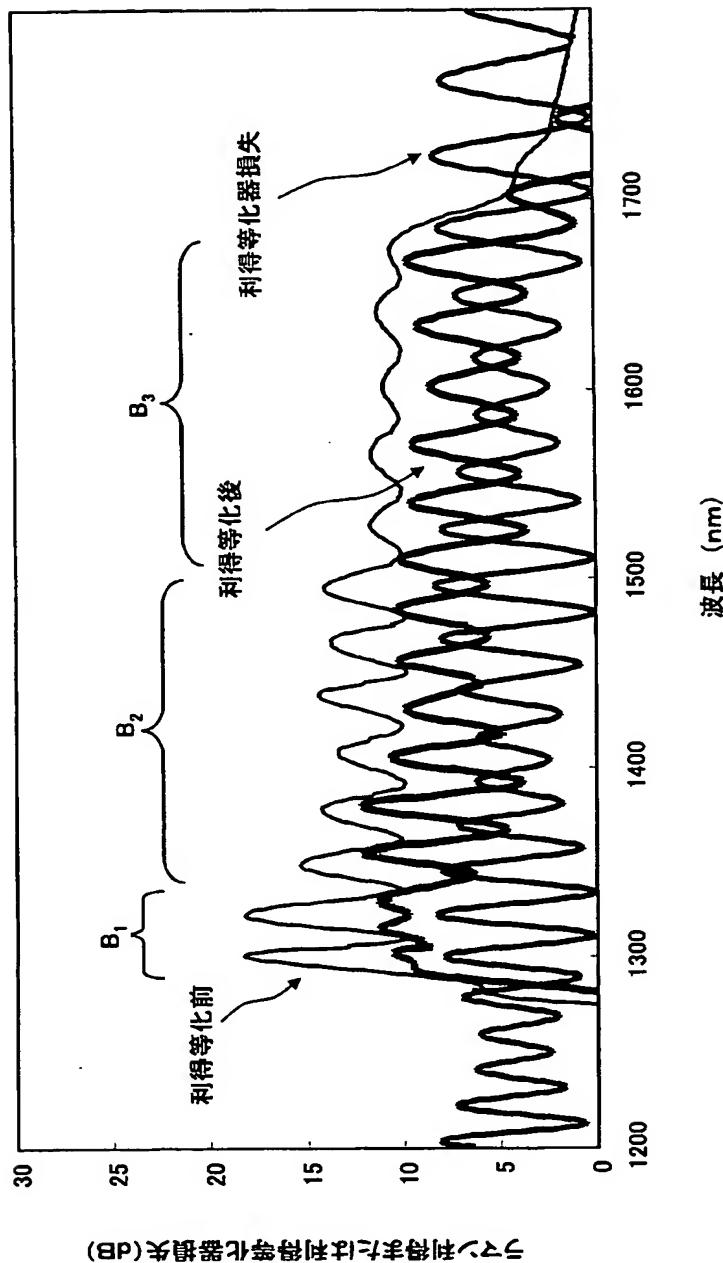
【図36】

ラマンシフト周波数の約4倍の増幅帯域幅を有する  
従来のラマン増幅器の利得波長特性の拡大図



【図37】

従来のラマン増幅器の利得波長特性について  
周期的な損失波長特性を有する光フィルタで利得等化した一例



【書類名】要約書

【要約】

【課題】 システム性能劣化を抑えながらラマン利得の波長偏差を容易に低減できるラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システムを提供する。

【解決手段】 本発明のラマン増幅器は、ラマンシフト周波数に従って信号光波長帯域を短波長側にシフトした帯域内に等波長間隔で配置された第1励起光と、その第1励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるよう波長およびパワーが設定された第2励起光と、を増幅媒体にそれぞれ供給してWDM信号光をラマン増幅し、そのWDM信号光のパワーの波長偏差を、ラマン利得のピーク波長間隔に対応した周期性を有する利得等化器を利用して低減する。

【選択図】 図1

特願 2003-093023

出願人履歴情報

識別番号 [000005223]

1. 変更年月日 1996年 3月26日

[変更理由] 住所変更

住 所 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号  
氏 名 富士通株式会社